(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 112242438 B
(45)授权公告日 2024.12.27

(21)申请号 202010401293.X

(22)申请日 2020.05.13

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112242438 A

(43)申请公布日 2021.01.19

(30)优先权数据
2019-133841 2019.07.19 JP

(73)专利权人 高谷信一郎
地址 日本东京都武蔵野市境4-3-11

(72)发明人 高谷信一郎

(74)专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司 44102
专利代理师 李珊珊

(51)Int.Cl.
H01L 29/737(2006.01)
H01L 29/06(2006.01)

(56)对比文件
JP 2003309128 A,2003.10.31
JP 2009094148 A,2009.04.30
CN 106505100 A,2017.03.15

审查员 史敏娜

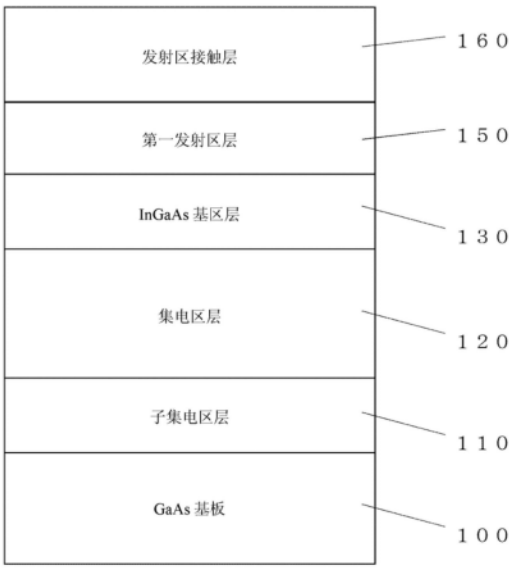
权利要求书1页 说明书18页 附图27页

(54)发明名称

化合物半导体异质结双极晶体管

(57)摘要

本发明提供一种化合物半导体异质结双极晶体管,包括发射区层及基区层的结构,在将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT中,降低在发射区层与基区层的界面产生的传导带能垒对作为功率放大器的特性的影响。第一发明中,将具有CuPt型秩序的InGaP用于发射区层。第二发明中,使赝晶生长InGaAs基区层的发射区层侧的部分的p型杂质浓度低于集电区层侧。



CN 112242438 B

1.一种化合物半导体异质结双极晶体管,为包括在GaAs基板上依次形成的集电区层、基区层及发射区层的npn型双极晶体管,其特征在于,

所述集电区层、所述基区层及所述发射区层均包含在所述GaAs基板上磊晶生长且实质上并无由与GaAs的晶格失配所致的晶格应变的弛豫的化合物半导体层,

所述基区层至少包含赝晶生长的InGaAs层,且

所述发射区层至少包含具有CuPt型秩序的第一InGaP层以及在所述第一InGaP层上与所述基区层相反侧的第二InGaP层,且

所述第二InGaP层大致无CuPt型秩序,

在所述第一InGaP层与所述第二InGaP层之间的界面附近的所述第一InGaP层、所述第二InGaP层或两者的n型杂质浓度高于所述第一InGaP层与所述第二InGaP层中除了所述界面附近的部分之外的任何部分中的n型杂质浓度。

2.根据权利要求1所述的化合物半导体异质结双极晶体管,其特征在于,

所述具有CuPt型秩序的第一InGaP层在室温下的带隙处于1.76 eV至1.86 eV的范围。

3.根据权利要求2所述的化合物半导体异质结双极晶体管,其特征在于,

将所述具有CuPt型秩序的第一InGaP层的组成记述为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i处于0.48至0.5的范围。

4.根据权利要求1所述的化合物半导体异质结双极晶体管,其特征在于,

将所述InGaAs层的组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j的平均值处于0.05至0.12的范围。

化合物半导体异质结双极晶体管

技术领域

[0001] 本发明涉及一种化合物半导体异质结双极晶体管(compound semiconductor heterojunction bipolar transistor),具有在GaAs基板上依次磊晶生长的发射区层(emitter layer)、基区层(base layer)及集电区层(collector layer),所述发射区层、基区层及集电区层包含实质上并无由与GaAs的晶格失配所致的晶格应变的弛豫的半导体层,尤其基区层至少包含由赝晶(pseudomorphic)生长所得的InGaAs层。

背景技术

[0002] 异质结双极晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor,以下简称为HBT)为在发射区使用带隙(band gap)大于基区的半导体材料的双极晶体管,能够同时实现高的电流放大率与低的基区电阻。其中,由在GaAs基板上磊晶生长且并无由与GaAs的晶格失配所致的晶格应变的弛豫的化合物半导体层来构成晶体管的本征部分的HBT(以下称为GaAsHBT)尤其在用作npn型晶体管时,作为在发射区集电区间流动的电流的主载体的传导电子的迁移率高,因而适于高频用途。因此,GaAsHBT被广泛地用作移动体通信或无线保真(Wireless Fidelity,WiFi)用的射频(Radio Frequency,RF)功率放大器。

[0003] 通常的GaAsHBT中,基区层、集电区层均使用与基板相同的GaAs作为主材料,晶格常数与基板相同,因而并无由晶格失配所致的晶格应变的弛豫。但是,本发明的GaAsHBT中,在基区层使用InGaAs(参照非专利文献1、非专利文献2、专利文献1)。InGaAs的晶格常数大于作为基板的GaAs,其差与In含量大致成比例,但获得作为晶体管而良好的特性,因此通过赝晶生长在维持压缩应变的状态下进行生长,所述赝晶生长不存在由晶格失配所致的晶格应变的因位错产生所引起的弛豫、也就是应变弛豫。若InGaAs层的厚度超过临界膜厚,则因产生位错而引起应变弛豫,在结晶内产生晶格缺陷。晶格缺陷作为在基区移动的传导电子(少数载子)与空穴的复合中心发挥作用,另外,复合时释出的能量进一步使晶格缺陷增殖。与场效晶体管那样的使用多数载子的晶体管相比,将基区层中的传导电子那样的少数载子用于晶体管运行的双极晶体管中,需要更严格地抑制由应变弛豫所致的晶格缺陷的产生。因此,与所述临界膜厚相比,InGaAs基区层的厚度充分减薄。例如在将InGaAs基区层的组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时,当In含量j为0.1时基区层的厚度设为40nm左右以下,当In含量j为0.07时基区层的厚度设为60nm左右以下。

[0004] 对于这样将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT来说,虽然存在元件制作上的困难或结构上的限制,但除了传导电子的迁移率高等通常已知的优点以外,还存在由于InGaAs的带隙小于GaAs而获得的以下优点。在双极晶体管的运行中,将发射区接地并对基区施加正电压,用来将从发射区通过基区到达集电区的电子电流设为某一定的阈值以上的基区发射区间电压被称为导通Vbe(turn-on Vbe)。导通Vbe有用于基区的半导体的带隙越小则越变小的倾向。在图36(a)和图36(b)中,分别表示对基区包含GaAs层、InGaAs层的GaAsHBT通过二维器件模拟所计算的传导带能及价电子带能的深度依赖性。图36(b)所示的示例中,将InGaAs的组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j为0.1。横轴为以发射区层内部作为

原点所测得的基区集电区方向的深度。图36(b)所示的将InGaAs用于基区层的GaAsHBT中，在GaAs集电区层与InGaAs基区层之间，插入有In浓度从GaAs连续地变化至InGaAs基区层的In浓度的组成梯度层(图中表示为“组成梯度InGaAs集电区层”)。将组成记述为$In_kGa_{1-k}As$时的In含量k是以在GaAs集电区层侧大致成为0，在InGaAs基区层侧大致成为0.1的方式连续地变化。其原因在于，使传导带的能量从集电区平滑地连接至基区。其结果，图中所示的传导带的基区集电区间能量尖峰的高度降低，传导电子从基区向集电区的注入不易受阻。基区层的p型杂质浓度在GaAs基区的情况(图36(a))、InGaAs基区的情况(图36(b))下均为$4\times10^{19}cm^{-3}$。如图36(b)中粗的向下箭头所示，将InGaAs用于基区层的GaAsHBT中，伴随带隙的减小，基区层的传导带能与将GaAs用于基区层时相比低88meV，可减小导通Vbe。使导通Vbe降低在应用于高频功率放大器的方面优选。以下对其原因进行说明。图37为示意性地表示针对多个不同的基区电流(Ib)表示GaAsHBT的集电区电流(Ic)和集电区发射区间电压(Vce)的特性的曲线(细实线)和负载曲线(粗实线)的图。作为晶体管的尺寸，设想发射区面积360平方微米。所谓负载曲线，是高频运行时对晶体管的输出侧的负载施加的电压和电流在运行频率的轨迹，描绘环状曲线。图37中的三条曲线分别为集电区的直流(Direct Current，DC)偏置电压Vce0为1V、3V、5V的情况。关于负载曲线，在高Vce区域中Ic被抑制得低，另一方面，在Vce为0.5V左右的低Vce区域(图37中表示为“低Vce区域”)中急剧上升。由此，输出信号的电压振幅与电流振幅的重叠变小而功率损耗得到抑制，因此功率附加效率(Power Added Efficiency，PAE)提高。这种负载曲线能够通过下述方式来实现，即：以休止时的Ic变低的方式设定基区的DC偏置电压Vbe0，进而使输出的二次谐波成分短路等。图37所示的负载曲线为输出饱和而PAE达到最大的情况。饱和运行时的PAE提高对于以饱和输出时的运行作为前提的功率放大器来说重要。尤其是包络线追踪型(envelope tracking type)功率放大器中，根据调变信号的振幅变化使Vce0动态变化，高输出时提高Vce0，低输出时降低Vce0。由此，晶体管一直以PAE达到最大的饱和区域运行，因此不仅是高输出时，也能够提高低输出时的PAE。为了提高包络线追踪型功率放大器的性能，需要在PAE最大时的负载曲线上的各点获得良好的特性，但尤其图中表示为“低Vce区域”的区域的晶体管的特性改善变得重要。“低Vce区域”中Vce为0.5V左右。另一方面，为了使晶体管成为接通状态而集电区电流Ic流动，基区发射区间电压Vbe成为远高于0.5V的正电压。例如，成为Ic＝0.01A的Vbe通常为1.25V以上。因此，对基区集电区间的pn接合施加的电压(Vbc)成为高的顺向电压。因此基区集电区间的电容Cbc变得非常大，成为输出饱和区域的PAE和功率放大率降低的主要原因。但是，在将InGaAs用于基区层而使导通Vbe降低时，获得相同的Ic所需的Vbe变小，因此基区集电区间的顺向电压变小。其结果，Cbc的增大得到抑制，能够抑制功率放大器的输出饱和时的特性劣化。

[0005] 接下来，针对GaAsHBT的发射区说明现有技术。通常在HBT中，在发射区层使用带隙大于基区层的半导体。由此，存在于基区层的空穴向发射区层的注入得到抑制，因此即便是为了降低基区层的薄片电阻而将基区层中的空穴设为高浓度时，也能够将从基区层流至发射区层的空穴电流抑制得低，能够将集电区电流与基区电流之比即电流放大率维持得高。作为与GaAs的晶格失配小且带隙大的半导体材料，已知AlGaAs或InGaP，但表面的化学稳定性优异的InGaP近年来被广泛地用作GaAsHBT的发射区层。通过将记述组成为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i设为0.48至0.5，从而晶格常数与GaAs大致一致。用于GaAsHBT的InGaP层通常是由

有机金属化学气相沉积法(metalorganic chemical vapor deposition,MOCVD)来制作,根据由光致发光(photoluminescence)所致的发光的波长所求出的带隙(Eg)在室温下为1.89eV左右(非专利文献3)。相对于GaAs的Eg为1.42eV、InGaAs的Eg低于1.42eV,其为充分大的值。

[0006] 以前用于GaAsHBT的发射区的InGaP的Eg如上文所述那样为1.89eV,但作为本发明的现有技术,已知以下将述的特殊的InGaP。通常所得的InGaP中,In和Ga不规则地占有III族元素的晶格位置。但是,通过使用特殊的生长条件或生长法,从而能够生长下述结晶,此结晶具有GaP与InP的单分子层在结晶的(111)方向交替地排列的CuPt型秩序。通常的InGaP大致无秩序化,如上文所述那样,当可获得与GaAs的晶格匹配的In含量、也就是将组成记述为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i处于0.48至0.5的范围时,Eg在室温下为约1.89eV。以下,将与GaAs晶格匹配的Eg=1.89eV的InGaP称为“现有的InGaP”。另一方面,随着CuPt型秩序化进展而Eg降低。在非专利文献4报告了下述方法,即:在MOCVD法中提高生长温度,生长具有CuPt型秩序的InGaP。所述文献中的图4(FIG.4)中,表示了室温下的Eg的生长温度依赖性。伴随生长温度的上升而Eg降低,在生长温度650℃时成为Eg=1.86eV。但是,若生长温度进一步变高则CuPt型秩序再次降低,Eg上升。进而,作为生长CuPt型秩序进展的InGaP的方法,报告了下述InGaP生长方法,此InGaP生长方法利用交替地供给In原料气体与Ga原料气体的所谓原子层磊晶生长法(非专利文献5)。根据所述方法,可获得秩序化进展至Eg=1.76eV的InGaP。这样具有CuPt型秩序的InGaP以前已作为材料而为人所知,但并无用作将赝晶型生长InGaAs用作基区层的GaAsHBT的发射区材料的示例。

[0007] [现有技术文献]

[0008] [专利文献]

[0009] [专利文献1]日本专利第6378398号

[0010] [非专利文献]

[0011] [非专利文献1]P.M.恩奎斯特(P.M.Enquist)、L.R.兰伯格(L.R.Ramberg)、F.E.纳加(F.E.Najjar)、W.J.沙夫(W.J.Schaff)及L.F.伊士曼(L.F.Eastman),《应用物理快报》(Applied Physics Letters),第49卷,第3期,1986年7月21日,p.179。

[0012] [非专利文献2]D.A.阿玛莉(D.A.Ahmari)、M.T.弗莱斯那(M.T.Fresina)、Q.J.哈特曼(Q.J.Hartmann)、D.W.巴拉格(D.W.Barlage)、P.J.马莱斯(P.J.Mares)、M.冯(M.Feng)及G.E.斯蒂尔曼(G.E.Stillman),《IEEE电子器件快报》(IEEE Electron Device Letters),第17卷,第5期,1996年5月,p.226。

[0013] [非专利文献3]M.察豪(M.Zachau)及W.T.马赛林克(W.T.Masselink),《应用物理快报》(Applied Physics Letters),第60卷,第17期,1992年4月27日,p.2098。

[0014] [非专利文献4]Q.刘(Q.Liu)、S.德克森(S.Derksen)、W.普罗斯特(W.Prost)、A.林德那(A.Lindner)及F.J.特古德(F.J.Tegude),《应用物理期刊》(Journal of Applied Physics),第79卷,第1期,1996年1月1日,p.305。

[0015] [非专利文献5]N.El-马斯里(N.El-Masry)及S.M.本达(S.M.Bedair),《光与量子电子学》(Optical and Quantum Electronics),第23卷,1991,S909。

发明内容

[0016] [发明所要解决的问题]

[0017] 如上文所述,将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT与将GaAs用于基区层的情况相比,可期待应用于功率放大器等的特性改善。但是,有关发射区层而存在以下的问题点。InGaAs与GaAs相比带隙小。因此,在将InGaP用于发射区层时,InGaP/InGaAs异质结界面处的传导带能的不连续大于InGaP/GaAs异质结界面。在图38(a)、图38(b)中,分别针对将GaAs、InGaAs用于基区层的GaAsHBT,表示通过二维器件模拟所计算的传导带能的发射区基区接合附近的深度依赖性。在发射区层/基区层异质结界面的发射区层侧存在三角形状的尖峰状能垒(energy barrier),GaAs基区层的情况下其高度低至24meV。此值小于室温(300K)的热能单位kT(k为玻尔兹曼常数(Boltzmann constant),T为绝对温度)即26meV。但是,在三角形状的能垒的顶上附近,产生由隧穿(tunnelling)所致的电子的透过,因而实质的垒高度进一步降低。因此,GaAs基区层的情况下,尖峰状能垒对电子传导的阻碍小至可忽视的程度。但是,InGaAs基区的情况下,伴随带隙减小而传导带能降低,因此如图38(b)所示那样,发射区层/基区层异质结界面的尖峰状能垒的高度高达105meV。此值相当于室温下的热能单位的4倍。传导电子为了从发射区层流入基区层到达集电区,必须越过所述能垒。当不存在能垒时,如上文所述那样,由于InGaAs的带隙小于GaAs而导通Vbe降低,获得了良好的晶体管特性。但是,当将InGaP用于发射区层时,导通Vbe是由所述能垒决定,大幅度地损及由InGaAs基区层所带来的带隙减小的效果。本发明的目的在于提供一种解决将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT的所述问题点的、新的发射区基区半导体层结构。

[0018] [解决问题的技术手段]

[0019] 为了解决所述将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT的问题点,本申请第一发明的GaAsHBT将具有CuPt型秩序的InGaP用于发射区层。

[0020] 本申请第一发明的更优选的一形态中,所述具有CuPt型秩序的InGaP在室温下的带隙处于1.76eV至1.86eV的范围。

[0021] 本申请第一发明的更优选的一形态中,将记述所述具有CuPt型秩序的InGaP的组成为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i设为0.48至0.5的范围。

[0022] 本申请第一发明的更优选的一形态中,将记述InGaAs基区层的组成为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j设为0.05至0.12的范围。

[0023] 为了解决所述将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT的问题点,本申请第二发明的GaAsHBT使InGaP发射区层侧(以下称为第二InGaAs基区层)的p型杂质浓度低于赝晶生长InGaAs基区层的集电区层侧(以下称为第一InGaAs基区层)的p型杂质浓度。

[0024] 本申请第二发明的优选的一形态中,与第一InGaAs基区层的p型杂质浓度相比,将第二InGaAs基区层的p型杂质浓度设为1/2以下。

[0025] 本申请第二发明的更优选的一形态中,将第一InGaAs基区层的p型杂质浓度设为$2\times10^{19}cm^{-3}$以上。

[0026] 本申请第二发明的更优选的一形态中,将第二InGaAs基区层的厚度设为1nm至6nm的范围。

[0027] 本申请第二发明的更优选的一形态中,第一InGaAs基区层、第二InGaAs基区层均将记述InGaAs组成为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j的平均值设为0.05至0.12的范围。

[0028] 本申请第二发明的更优选的一形态中,将InGaP层用于发射区层。

[0029] [发明的效果]

[0030] 根据本发明,能够在将赝晶生长InGaAs用于基区层的GaAsHBT中,降低发射区/基区接合界面的尖峰状传导带能垒的影响,使导通Vbe降低。由此,能够实现PAE等基本特性优异的高频功率放大器。

附图说明

[0031] 图1为表示本申请第一发明的GaAsHBT的主要构成元件的半导体层结构。

[0032] 图2为表示具有图1所示的主要构成元件的本申请第一发明的GaAsHBT的一实施例的截面结构。

[0033] 图3为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的传导带能、价电子带能、费米能级的深度依赖性的图。

[0034] 图4为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的传导带能的深度依赖性的图。

[0035] 图5为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的在发射区基区接合处产生的尖峰状能垒高度与InGaP发射区层的带隙Eg的关系的图。

[0036] 图6为表示在图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT中对基极与集电极施加相同的正的电压Vbe时的、集电区电流Ic的Vbe依赖性的图。

[0037] 图7为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的导通Vbe与InGaP发射区层的带隙Eg的关系的图。

[0038] 图8为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc的集电区电流Ic依赖性的图。

[0039] 图9为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的功率放大率MSG/MAG的集电区电流Ic依赖性的图。

[0040] 图10为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc与InGaP发射区层的带隙Eg的关系的图。

[0041] 图11为表示图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的功率放大率MAG与InGaP发射区层的带隙Eg的关系的图。

[0042] 图12为表示包含GaAsHBT的功率放大器的特性分析用电路的图。

[0043] 图13为表示使包含图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的功率放大器以图12所示的特性分析电路运行时的集电区电流Ic、集电区发射区间电压Vce的时间变化的图。

[0044] 图14为表示使包含图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的功率放大器以图12所示的特性分析电路运行时所得的功率附加效率PAE的输出功率依靠性的图。

[0045] 图15为表示使包含图2所示的本申请第一发明的GaAsHBT的功率放大器以图12所示的特性分析电路运行时所得的功率放大率的输出功率依赖性的图。

[0046] 图16为表示本申请第一发明的GaAsHBT的另一实施例的主要构成元件的半导体层结构。

[0047] 图17为表示本申请第二发明的GaAsHBT的主要构成元件的半导体层结构。

[0048] 图18为表示具有图17所示的主要构成元件的本申请第二发明的GaAsHBT的一实施例的截面结构。

[0049] 图19为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的传导带能、价电子带能、费米能级的深度依赖性的图。

[0050] 图20为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的传导带能的深度依赖性的图。

[0051] 图21为表示在图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT中对基极与集电极施加相同的正的电压Vbe时的、集电区电流Ic的Vbe依赖性的图。

[0052] 图22为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的导通Vbe与第二InGaAs基区层240的厚度X的关系的图。

[0053] 图23为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的导通Vbe、和第二InGaAs基区层240与第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度之比Np2/Np1的关系的图。

[0054] 图24为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc的集电区电流Ic依赖性的图。

[0055] 图25为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的功率放大率MSG/MAG的集电区电流Ic依赖性的图。

[0056] 图26为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc与第二InGaAs基区层240的厚度X的关系的图。

[0057] 图27为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的功率放大率MAG与第二InGaAs基区层240的厚度X的关系的图。

[0058] 图28为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的|H21|2与InGaAs基区层240的厚度X的关系的图。

[0059] 图29为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT在与图20不同的另一实施例的传导带能的深度依赖性的图。

[0060] 图30为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc、和第二InGaAs基区层240与第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度之比Np2/Np1的关系的图。

[0061] 图31为表示图18所示的本申请第二发明的GaAsHBT的功率放大率MAG、和第二InGaAs基区层240与第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度之比Np2/Np1的关系的图。

[0062] 图32为表示作为将本申请第一发明与本申请第二发明组合的实施例的GaAsHBT的传导带能的深度依赖性的图。

[0063] 图33为表示在作为将本申请第一发明与本申请第二发明组合的实施例的GaAsHBT中对基极与集电极施加相同的正的电压Vbe时的、集电区电流Ic的Vbe依赖性的图。

[0064] 图34为表示作为将本申请第一发明与本申请第二发明组合的实施例的GaAsHBT的基区集电区电容Cbc的集电区电流Ic依赖性的图。

[0065] 图35为表示作为将本申请第一发明与本申请第二发明组合的实施例的GaAsHBT的功率放大率MSG/MAG的集电区电流Ic依赖性的图。

[0066] 图36(a)为表示将GaAs用于基区层的现有的GaAsHBT的传导带能、价电子带能、费米能级的深度依赖性的图。

[0067] 图36(b)为表示将InGaAs用于基区层的现有的GaAsHBT的传导带能、价电子带能、费米能级的深度依赖性的图。

[0068] 图37为示意性地表示针对多个不同的基区电流(Ib)表示GaAsHBT的集电区电流

(Ic)和集电区发射区间电压(Vce)的电流电压特性的曲线(细实线)、及使晶体管作为功率放大器运行时的负载曲线(粗实线)的图。

[0069] 图38(a)为表示将GaAs用于基区层的现有的GaAsHBT的传导带能的深度依赖性的图。

[0070] 图38(b)为表示将InGaAs用于基区层的现有的GaAsHBT的传导带能的深度依赖性的图。

[0071] [符号的说明]

[0072] 100、200:GaAs基板

[0073] 110、210:子集电区层

[0074] 120、220:集电区层

[0075] 121、221:第一集电区层

[0076] 122、222:第二集电区层

[0077] 130:InGaAs基区层

[0078] 150:第一发射区层

[0079] 151:第二发射区层

[0080] 160、260:发射区接触层

[0081] 161:高浓度GaAs发射区接触层

[0082] 162、261:GaAs发射区接触层

[0083] 163、262:InGaAs发射区接触层

[0084] 170、270:发射极

[0085] 180、280:基极

[0086] 190、290:集电极

[0087] 199、299:表示发射区宽度的箭头

[0088] 230:第一InGaAs基区层

[0089] 240:第二InGaAs基区层

[0090] 250:发射区层。

具体实施方式

[0091] 以下,一边参照图式一边对本发明的实施方式进行说明。

[0092] 图1为表示本申请第一发明的GaAsHBT的主要构成元件的半导体层结构。在GaAs基板100上,通过磊晶生长而形成有子集电区层110、集电区层120、InGaAs基区层130、第一发射区层150及发射区接触层160。GaAs基板100的面方位为(100)。子集电区层110、集电区层120、第一发射区层150及发射区接触层160为n型半导体,InGaAs基区层130为p型。子集电区层110、集电区层120、InGaAs基区层130及第一发射区层150构成npn型晶体管的本征部分,这些层均使用并无由与GaAs的晶格失配所致的晶格应变的弛豫的半导体层。对于子集电区层110及集电区层120,例如使用与基板材料相同的GaAs。或者,也可使用基本不存在与GaAs的晶格失配的其它半导体,例如InGaP、AlGaAs或这些半导体的层叠结构。InGaAs基区层130是通过赝晶(pseudomorphic)生长在维持压缩应变的状态下不应变弛豫地生长。对于第一发射区层150,使用作为本申请第一发明的特征的具有CuPt型秩序的InGaP。所谓CuPt型秩

序,如上文所述那样,为GaP与InP的单分子层在结晶的(111)方向交替地排列的结构。现有的与GaAs晶格匹配的InGaP的带隙(Eg)为1.89eV,但对于具有CuPt型秩序的InGaP来说,Eg低于1.89eV,随着秩序化增加而变小。经完全秩序化的理想结晶的组成在记述为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i为0.5,成为表示为InGaP2的化合物,但实用上i只要处于0.48至0.5的范围则无问题。若i处于所述范围,则同时与GaAs的晶格失配也几乎消失,因此能够容易地生长并无应变弛豫的层。通过将具有CuPt型秩序的InGaP用于第一发射区层150从而获得的效果将在下文描述。

[0093] 图2所示的GaAsHBT的截面结构为将具有图1所示的主要构成元件的GaAsHBT用作功率放大器时的典型例。本实施例中,发射区是分为三个区域,图2中的箭头199所示的各发射区的宽度为3微米。另外,与纸面正交的方向的发射区尺寸(长度)为40微米。因此,发射区面积为360平方微米。图2所示的GaAsHBT中,在发射区接触层160上设有发射极170,在InGaAs基区层130上设有基极180,在子集电区层110上设有集电极190,通过这些电极而获得与晶体管的各区域的电连接。另外图2中,集电区层120包含两层的层叠结构,发射区接触层160包含三层的层叠结构。表1是表示也包含这些层叠结构的半导体层各层的导电型、杂质的种类和浓度、层的厚度。第一集电区层121包含GaAs。对于第二集电区层122,以半导体的组成在第一集电区层121侧成为GaAs,在InGaAs基区层130侧成为InGaAs的方式对In含量设有梯度。也就是说,使记述组成为$In_kGa_{1-k}As$时的In含量k以在第一集电区层121侧大致成为0,在InGaAs基区层130侧大致成为0.1的方式连续地变化。其原因在于,使传导带能从第一集电区层121平滑地连接至InGaAs基区层130。InGaAs基区层130的p型杂质为碳(C),浓度为$4\times10^{19}cm^{-3}$。表1所示的实施例中,InGaAs基区层的In含量、也就是将组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j为0.1,厚度为35nm。如现有技术的项中所述那样,InGaAs基区层的厚度是根据In含量而选择优选的值。第一发射区层150为作为本发明的特征的具有CuPt型秩序的InGaP,将组成记述为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i为0.48。具有CuPt型秩序的InGaP具有自发极化(spontaneous polarization),当用于第一发射区层150时,在发射区接触层侧的表面产生由自发极化所引起的负电荷。高浓度GaAs发射区接触层161是为了抵消由自发极化所引起的负电荷而提高了作为n型杂质的Si的浓度的层,抑制传导带能因由自发极化所引起的负电荷而上升。本实施例中,除了最上部的InGaAs发射区接触层163以外,使GaAs基板100上的半导体层全部在不使由与GaAs的晶格失配所致的应变实质上弛豫的情况下生长。由此,可获得并无因应变弛豫而产生的晶格缺陷的、特性优异的元件。另一方面,InGaAs发射区接触层163为了获得与图2所示的发射极170的良好的欧姆性接触而充分增大In的含量。因此,在InGaAs发射区接触层163中发生应变弛豫而产生晶格缺陷,但通过使下层的GaAs发射区接触层162的厚度增厚至110nm,从而防止晶格缺陷的影响波及元件的本征区域而使特性劣化。

[0094] 以下,对本申请第一发明的效果进行说明。首先,对图2及表1所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的带端能的结构进行说明。图3表示传导带能、价电子带能及费米能级的从第一发射区层150到InGaAs基区层130、第二集电区层122、第一集电区层121的深度依赖性。图4为针对接合部分将传导带能的深度依赖性放大表示的图。未对晶体管施加电压,因此如图3所示那样,费米能级在深度方向一定。图3、图4中,在表示为第一发射区层150的部分表示了虚线和实线,但虚线为将第一发射区层150替换为由现有的InGaP所得的发射

区层的情况,尖峰状能垒的高度如图38(b)中作为现有例所示那样为105meV。另一方面,实线为本发明的GaAsHBT的情况,为将在室温下的带隙(Eg)为1.81eV的具有CuPt型秩序的InGaP用于第一发射区层150的情况。首先,对图3所示的价电子带能进行说明。表示为第一发射区层150的部分的价电子带能在替换为现有的InGaP层时与本发明的具有CuPt型秩序的InGaP层时几乎无差异,因此重叠表示。这是InGaP的CuPt型秩序的特征,由秩序化所致的带隙的减小几乎全部由传导带能的降低所引起,价电子带的能量未改变(非专利文献4)。利用由发射区层的价电子带所形成的垒来抑制基区层内的空穴向发射区层的注入为HBT的特征,但本发明的InGaP发射区层中,也可获得与使用现有的InGaP的发射区层的情况同等的效果。接下来,着眼于传导带能。第一发射区层150与InGaAs基区层130的界面的尖峰状的能垒的高度如图4所示那样,在将第一发射区层150替换为现有的InGaP时(虚线)为105meV,相对于此,在将具有CuPt型秩序的InGaP用于发射区层的本发明中大幅度地降低(实线)。图4所示的Eg为1.81eV时,尖峰状能垒的高度为25meV。这与图38(a)所示的GaAs基区层的尖峰状能垒为相同的高度,垒的影响几乎消失。图5为表示图4所示的尖峰状能垒高度与用于第一发射区层150的具有CuPt型秩序的InGaP的Eg的关系的图。Eg为1.89eV的点相当于将现有的InGaP用于发射区层的情况。当将具有CuPt型秩序的InGaP用于发射区层时,Eg根据秩序化的程度而降低,伴随于此,尖峰状能垒高度降低。图4中,将Eg为1.86eV以下的数据点表示为“本发明”。其原因在于,Eg为1.86eV以下时可获得特别明显的特性改善,其具体说明将在图11的说明处描述。

[0095] 表1

[0096]

编号	种类	导电型	杂质种类	杂质浓度（cm^{-3}）	厚度（nm）
163	InGaAs 发射区接触层	n 型	Si	$>5x10^{18}$	80
162	GaAs 发射区接触层	n 型	Si	$5x10^{18}$	110
161	高浓度 GaAs 发射区接触层	n 型	Si	$>5x10^{18}$	10
150	第一发射区层	n 型	Si	$3x10^{17}$	40
130	InGaAs 基区层（$In_jGa_{1-j}As$、j=0.1）	p 型	C	$4x10^{19}$	35
122	第二集电区层（$In_kGa_{1-k}As$、k=0～0.1）	n 型	Si	$1x10^{15}$	10
121	第一集电区层（GaAs）	n 型	Si	$1x10^{15}$～$1x10^{17}$	1000
110	子集电区层（GaAs）	n 型	Si	$5x10^{18}$	600
100	GaAs 基板	半绝缘	—	—	—

[0097] 接下来,对图2及表1所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的电直流特性(DC特性)进行说明。图6表示在图2所示的GaAsHBT中将发射极170接地,对基极180与集电极190施加相同的正的电压Vbe时的集电区电流Ic的Vbe依赖性,为通过所谓被称为古迈绘图

(Gummel Plot)的测定所得的Ic的特性。与图3、图4同样地,虚线为将第一发射区层150替换为由现有的InGaP所得的发射区层的情况。另一方面,实线为将室温下的带隙为1.81eV的具有CuPt型秩序的InGaP用于第一发射区层150的本发明的GaAsHBT的情况。Ic达到某个已决定的一定值的Vbe为导通Vbe。图6所示的两根Ic曲线横向平行移动75mV。也就是说,本发明的导通Vbe与定义导通Vbe的Ic无关,比以前低75mV。此变化是由图4所示的尖峰状能垒的高度从105meV降低80meV成为25meV所致。图7为表示导通Vbe与InGaP的Eg的关系的图。Eg为1.89eV的点为将第一发射区层150替换为由现有的InGaP所得的发射区层的情况。随着Eg的减小、也就是CuPt秩序的增大而导通Vbe减小。图7中,将Eg为1.86eV以下的数据点表示为“本发明”。其原因在于,Eg为1.86eV以下时可获得特别明显的特性改善,其具体说明将在图11的说明处描述。

[0098] 接下来,对图2及表1所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的高频特性进行说明。图8为表示基区集电区间电容Cbc的集电区电流Ic依赖性的图。将集电区发射区间电压Vce固定为0.5V,为了获得Ic依赖性而使基区发射区间电压Vbe变化。Cbc是根据频率f0=2GHz的Y参数使用以下的式子所计算。

[0099] $Cbc=-Im(Y12)/(2\pi f0)$

[0100] 此处,Im(Y12)为Y参数成分Y12的虚数部,π为圆周率。虚线为将第一发射区层150替换为由现有的InGaP所得的发射区层的情况,实线为本发明也就是具有CuPt型秩序的InGaP发射区的情况,表示在室温下的Eg为1.81eV的情况。图8所示的数据点的Ic为0.01A以上,全部进入图37所示的“低Vbe区域”。如由图6所得知那样,Ic成为0.01A以上的Vbe超过1.25V。另一方面,Vce为0.5V,因而Vbc为0.75V以上,也就是基区集电区间的pn接合处于高的顺向偏置状态。因此,图8中虚线所示的现有的GaAsHBT的情况下,随着Ic的增加、也就是顺向偏置增强,Cbc成为超过1pF的高值。相对于此,本发明的GaAsHBT的Cbc与以前相比大幅度地降低,Ic越高则降低程度越明显。其原因在于,由导通Vbe降低导致基区集电区间的顺向偏置变小。图9表示频率f0=2GHz时的最大功率放大率的Ic依赖性。与图8的Cbc同样地,集电区电压Vce为0.5V。纵轴表示为MSG/MAG,但这是最大稳定增益(Maximum Stable Gain,MSG)与最大可用增益(Maximum Available Gain,MAG)的简称。MAG为在晶体管满足不产生振荡的稳定条件时定义的最大功率放大率。另一方面,在晶体管不满足稳定条件的区域中,最大功率放大率是定义为通过外部元件强制稳定化时所得的值(MSG)。图9中,在Ic=0.05A处曲线的斜率急剧变化,但0.05A以下为MSG区域,0.05A以上为MAG区域。图9中,实线为本发明的GaAsHBT,表示InGaP发射区层在室温下的Eg为1.81eV的情况。与虚线所示的现有的GaAsHBT相比,无论在哪一电流时,MSG/MAG均高。这是由图8所示的Cbc的降低所致。Cbc在晶体管的功率放大中作为反馈电容发挥作用而使功率放大率降低。尤其在“低Vce区域”中,基区集电区间的pn接合成为强的顺向偏置状态,因此Cbc变得非常大,成为使功率放大率降低的支配性要因。根据本发明,在“低Vce区域”中能够大幅度地降低Cbc,能够抑制此区域中的功率放大率的降低。图10表示Cbc与Eg的关系,图11表示最大功率放大率与Eg的关系。Vce均为0.5V。另外,黑圆点是Ic为0.072A时的值,黑三角是Ic为0.144A时的值。Ic=0.072A、0.144A均进入图37所示的“低Vce区域”,但发射区的面积为360平方微米,因此若换算为发射区面的平均电流密度,则分别相当于20kA/cm^2、40kA/cm^2。图11中,Ic=0.072A、0.144A的任一情况下,最大功率放大率均成为MAG的区域,因此纵轴以MAG表示。图10及图11中,表示

为“现有”的数据点为将第一发射区层150替换为现有的InGaP的GaAsHBT的情况。随着InGaP的CuPt型秩序化进展而Eg减小,Cbc减小而MAG增加。为了获得本发明的明显效果,优选Ic＝0.072A(20kA/cm^2)时MAG改善现有的1dB以上,Ic＝0.144A(40kA/cm^2)时MAG改善现有的2dB以上。因此,将图11中满足所述条件的Eg范围即1.86eV以下表示为“本发明”。图5、图7、图10中,也同样地将Eg为1.86eV以下的区域表示为“本发明”。此外,非专利文献5中报告了CuPt型秩序化进展至Eg＝1.76eV的InGaP的生长。本申请第一发明也是若1.76eV≦Eg≦1.86eV则可获得充分的效果。

[0101] 接下来,对将图2及表1所示的本申请第一发明的GaAsHBT用于功率放大器时的特性提高进行说明。图12为包含GaAsHBT的功率放大器的特性分析用电路,为所谓负载牵引/源牵引(load-pull/source-pull)电路。对于连接RF输入端子的基极180,连接着用来使晶体管相对于振荡、温度上升而稳定化的包含电阻和电容的镇流器电路(ballast circuit)。进而,在RF输入端子侧,隔着阻断DC电压而仅使RF信号透过的DC隔断电容(DC block capacitor)而插入有源调谐器(source tuner)。源调谐器用于获取与晶体管的输入阻抗的阻抗匹配以使功率放大率变高。另一方面,在集电极190与RF输出端子之间,隔着DC隔断电容而插入有负载调谐器(load tuner)。负载调谐器用于获取与晶体管的输出侧阻抗的阻抗匹配以使RF输出在饱和时的功率附加效率(Power Added Efficinecy,PAE)的峰值变大。进而,为了抑制由二次谐波(将基波的频率设为f0时的2f0)所致的功率损耗,将2f0的阻抗(图12中记载为Z_{2f0})大致设为零。其它谐波成分的阻抗设为50欧姆。对于基极180、集电极190,分别隔着阻断RF电压而仅使DC电压透过的RF隔断电感器(RF block inductor)而施加DC偏置电压Vbe0、DC偏置电压Vce0。以下说明的结果为使用图2及表1所示的发射区面积360平方微米的元件作为GaAsHBT的情况。以并无RF输入功率时的Ic成为6mA的方式调节Vbe0。运行频率f0设为2GHz,源调谐器及负载调谐器的阻抗在Vce0＝3V时取得匹配。图13为以时间为横轴对本发明的GaAsHBT的RF运行时的Ic、Vce进行绘制而得的图。作为第一发射区层的InGaP的带隙为1.81eV。实线为Ic,虚线为Vce。实线、虚线均表示了三条曲线,但分别是Vce0为1V、3V、5V时的曲线。另外,这些曲线为功率附加效率PAE达到最大的功率饱和运行时的信号。Ic与Vce的重叠部分小,功率损耗小。这是由在负载调谐器中将二次谐波2f0的阻抗设为零等所得的效果。Ic的波峰时的值在Vce0＝1V的情况下为0.05A,在Vce0＝3V的情况下为0.17A,在Vce0＝5V的情况下为0.28A左右,另一方面,Ic达到波峰时的Vce为0.5V左右。也就是说,Ic波峰时GaAsHBT是以图37所说明的“低Vce区域”运行。图14表示PAE的输出功率依赖性,图15表示功率放大率的输出功率依赖性。图14、图15均针对集电区的DC偏置电压Vce0为1V、2V、3V、4V、5V时来表示特性。任一Vce0的情况下,虚线均为将第一发射区层150替换为现有的InGaP层的现有的GaAsHBT的情况。另一方面,细实线和粗实线为本发明的GaAsHBT的情况,细实线为将带隙Eg为1.85eV的CuPt型秩序InGaP用于第一发射区层的情况,粗实线为使用Eg为1.81eV的CuPt型秩序InGaP的情况。图14中,也表示了将功率附加效率的波峰连结的线。本发明的GaAsHBT的功率附加效率的峰值在任一Vce0的情况下均高于现有的GaAsHBT,当Eg为1.81eV时其差最大达到4％。这是由本发明的GaAsHBT的“低Vce区域”的Cbc降低和由此所引起的功率放大率的增大所致。Vce0越低,功率附加效率的提高越明显。其原因在于,如由图37所得知那样,若Vce0低则负载曲线进入“低Vce区域”内的比率增加。如现有技术的说明中也描述那样,包络线追踪型(envelope tracking type)功率放大器根据调变信号的

振幅变化而使Vce0动态变化,高输出时提高Vce0,低输出时降低Vce0。由此,使晶体管一直以功率附加效率达到最大的饱和区域运行。如图14所示那样,本发明的GaAsHBT的任一Vce0的情况下,功率附加效率的峰值均高于现有的GaAsHBT。另外,图15所示的功率放大率也是本发明的GaAsHBT高于现有的GaAsHBT。因此,通过使用本发明的GaAsHBT,从而能够在如功率放大器、特别是包络线追踪型放大器那样在功率饱和区域运行的功率放大器中大幅度地改善特性。

[0102] 以上所说明的本申请第一发明的实施例中,用于第一发射区层150的InGaP的CuPt型秩序在层内均匀,带隙一定。作为本申请第一发明的另一实施例,也可使CuPt型秩序以在与InGaAs基区层130的界面附近高,在远离界面的区域中降低的方式变化。由此,能够使极化电荷分散,能够减小由负的极化电荷所致的传导带能上升的影响。或者也可如图16所示,在第一发射区层150与发射区接触层160之间设置第二发射区层151,第一发射区层150设为具有CuPt型秩序的InGaP,第二发射区层151设为现有的InGaP。由此,能够维持将现有的InGaP用于发射区层的GaAsHBT的其它特性,并且降低在与InGaAs基区层130的界面产生的尖峰状能垒的高度而使导通Vbe降低。此外,图16中,第二发射区层151也可使用AlGaAs等InGaP以外的半导体。另外,也可提高第一发射区层150与第二发射区层151的界面附近的n型杂质浓度,降低在第一发射区层150的第二发射区层151侧表面产生的负的极化电荷的影响。

[0103] 以上所说明的本申请第一发明的实施例中,对InGaAs基区层130的In含量、也就是将组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j为0.1时进行了说明,但只要j处于0.05至0.12的范围,便可获得同样的效果。或者,也可将j的膜中的平均值设为0.05至0.12的范围,在与膜垂直的方向对j的值附加梯度。

[0104] 图17为表示本申请第二发明的GaAsHBT的主要构成元件的半导体层结构。在GaAs基板200上,通过磊晶生长而形成有子集电区层210、集电区层220、第一InGaAs基区层230、第二InGaAs基区层240、发射区层250及发射区接触层260。GaAs基板200的面方位为(100)。子集电区层210、集电区层220、发射区层250及发射区接触层260为n型半导体,第一InGaAs基区层230及第二InGaAs基区层240为p型。子集电区层210、集电区层220、第一InGaAs基区层230、第二InGaAs基区层240及发射区层250构成npn型晶体管的本征部分,这些层均使用并无由与GaAs的晶格失配所致的晶格应变的弛豫的半导体层。对于子集电区层210及集电区层220,例如使用与基板材料相同的GaAs。或者,也可使用几乎不存在与GaAs的晶格失配的其它半导体,例如InGaP、AlGaAs或这些半导体的层叠结构。第一InGaAs基区层230及第二InGaAs基区层240是通过赝晶(pseudomorphic)生长在维持压缩应变的状态下不产生应变弛豫地生长。此处,作为本发明的特征,在将第一InGaAs基区层230中的p型杂质浓度设为Np1,将第二InGaAs基区层240中的p型杂质浓度设为Np2时,Np2＜Np1的关系成立。

[0105] 本申请第二发明的优选的一形态中,$Np2 \leqq 0.5 \times Np1$。

[0106] 本申请第二发明的优选的一形态中,$Np1 \geqq 2 \times 10^{19} cm^{-3}$。

[0107] 本申请第二发明的优选的一形态中,第二InGaAs基区层240的厚度处于1nm至6nm的范围。

[0108] 本申请第二发明的优选的一形态中,第一InGaAs基区层230及第二InGaAs基区层240均是将其组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j的平均值处于0.05至0.12的范围。

[0109] 图18所示的GaAsHBT的截面结构为将具有图17所示的主要构成元件的GaAsHBT用作功率放大器时的典型例。本实施例中,发射区是分为三个区域,图18中的箭头299所示的各发射区的宽度为3微米。另外,与纸面正交的方向的发射区尺寸(长度)为40微米。因此,发射区面积为360平方微米。图18所示的GaAsHBT中,在发射区接触层260上设有发射极270,在第二InGaAs基区层240上设有基极280,在子集电区层210设有集电极290,通过这些电极而获得与晶体管的各区域的电连接。另外,图18中,集电区层220及发射区接触层260均包含两层的层叠结构。表2是表示也包含这些层叠结构的半导体层各层的导电型、杂质的种类和浓度、层的厚度。第一集电区层221包含GaAs。对于第二集电区层222,以半导体的组成在第一集电区层221侧成为GaAs,在第一InGaAs基区层230侧成为InGaAs的方式对In含量设有梯度。也就是说,将组成记述为$In_kGa_{1-k}As$时的In含量k是以在第一集电区层侧大致成为0,在第一InGaAs基区层230侧大致成为0.1的方式连续地变化。其原因在于,使传导带能从第一集电区层221平滑地连接至第一InGaAs基区层230。第一InGaAs基区层230和第二InGaAs基区层240的p型杂质为碳(C),浓度分别为Np1、Np2。作为本发明的特征,Np2小于Np1。其效果将在下文描述。InGaAs基区层整体的厚度为35nm,其中第二InGaAs基区层240的厚度为X。X成为大于0nm且小于35nm的范围,但这也如下文将说明那样,1nm≦X≦6nm时可获得特别明显的特性改善。第一InGaAs基区层230和第二InGaAs基区层240的In含量、也就是将组成记述为$In_jGa_{1-j}As$时的In含量j为0.1。如现有技术的项中所述那样,InGaAs基区层整体的厚度(本实施例中为35nm)是根据In含量来选择优选的值。对于发射区层250,使用在室温下的Eg为1.89eV的通常的InGaP。将组成记述为$In_iGa_{1-i}P$时的In含量i为0.48。本实施例中,除了最上部的InGaAs发射区接触层262以外,使GaAs基板200上的半导体层全部在不使由与GaAs的晶格失配所致的应变实质上弛豫的情况下生长。由此,可获得不存在因应变弛豫而产生的晶格缺陷的、特性优异的元件。另一方面,InGaAs发射区接触层262为了获得与图18所示的发射极270的良好的欧姆性接触而充分增大In的含量。因此,InGaAs发射区接触层262中发生应变弛豫而产生晶格缺陷,但通过将下层的GaAs发射区接触层261的厚度设为120nm,从而防止晶格缺陷的影响波及元件的本征区域而使特性劣化。

[0110] 表2

[0111]

编号	种类	导电型	杂质种类	杂质浓度（cm^{-3}）	厚度（nm）
262	InGaAs 发射区接触层	n 型	Si	$>5x10^{18}$	80
261	GaAs 发射区接触层	n 型	Si	$5x10^{18}$	120
250	发射区层（$In_iGa_{1-i}P$、i＝0.48）	n 型	Si	$3x10^{17}$	40
240	第二 InGaAs 基区层（$In_jGa_{1-j}As$、j＝0.1）	p 型	C	Np2	X
230	第一 InGaAs 基区层（$In_jGa_{1-j}As$、j＝0.1）	p 型	C	Np1	35－X
222	第二集电区层（$In_kGa_{1-k}As$、k＝0～0.1）	n 型	Si	$1x10^{15}$	10
221	第一集电区层（GaAs）	n 型	Si	$1x10^{15}$～$1x10^{17}$	1000
210	子集电区层（GaAs）	n 型	Si	$5x10^{18}$	600
200	GaAs 基板	半绝缘	—	—	—

[0112] 以下,对本申请第二发明的效果进行说明。首先,对图18及表2所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的带端能的结构进行说明。图19表示传导带能、价电子带能及费米

能级的从发射区层250到第二InGaAs基区层240、第一InGaAs基区层230、第二集电区层222、第一集电区层221的深度依赖性。图20为针对接合部分将传导带能的深度依赖性放大表示的图。未对晶体管施加电压,因此图19所示的费米能级在深度方向一定。图19、图20中,在发射区层250及第二InGaAs基区层240的部分表示了虚线和实线,虚线为X＝0nm而不存在第二InGaAs基区层240的情况,也就是现有的GaAsHBT的情况。另一方面,实线为本发明的GaAsHBT的情况,第二InGaAs基区层240的厚度X为2nm。另外,第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$,第二InGaAs基区层240的p型杂质浓度Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$。若着眼于图20所示的传导带能,则现有的GaAsHBT如图4中也作为现有例所示那样,尖峰状能垒的高度为105meV。相对于此,实线所示的本发明的GaAsHBT的情况下,尖峰状能垒高度为42meV而低63meV。以下对其原因进行说明。第一InGaAs基区层的p型杂质浓度高达$4\times10^{19}cm^{-3}$。通常若半导体中杂质浓度变高而导电载子的浓度变高,则费米能级进入带内而成为所谓简并半导体(degenerate semiconductor)。InGaAs与GaAs相比,价电子带的状态密度较低,因此p型半导体容易成为简并型,即便是相同的p型杂质浓度,与GaAs相比费米能级也更深地进入能带内。例如图36(a)、图36(b)所示的现有例中,作为p型杂质的碳的浓度均为$4\times10^{19}cm^{-3}$,但图36(b)所示的InGaAs基区与图36(a)所示的GaAs基区相比,费米能级更深地进入价电子带内。本申请第二发明中,使用p型InGaAs的本特征。由费米能级所测得的价电子带能视p型杂质(本实施例中为碳)浓度而变化。图19、图20所示的实施例中,第二InGaAs基区层240的碳浓度为$1\times10^{19}cm^{-3}$,为第一InGaAs基区层的碳浓度的四分之一。因此,如观看图19的第二InGaAs基区层240的部分所得知那样,从价电子带的费米能级来看的能量降低。因此将也包含传导带的带的能量整体向下方下拉,其结果,在发射区层250与基区层的界面附近产生的尖峰状能垒也被下拉。本特征在第一InGaAs基区层的p型杂质浓度为$2\times10^{19}cm^{-3}$以上时变得明显。

[0113] 接下来,对图18及表2所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的电直流特性(DC特性)进行说明。图21表示在图18所示的GaAsHBT中将发射极270接地,对基极280与集电极290施加相同的正的电压Vbe时的集电区电流Ic的Vbe依赖性,是通过所谓被称为古迈绘图的测定所得的Ic的特性。与图19、图20同样地,虚线为X＝0nm而不存在第二InGaAs基区层240的情况,也就是现有的GaAsHBT的情况。另一方面,实线为本发明的GaAsHBT的情况,本实施例中,第二InGaAs基区层240的厚度X为2nm,p型杂质浓度Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$。另外,第一InGaAs基区层230的杂质浓度Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$。Ic达到某个已决定的一定值的Vbe为导通Vbe。图21所示的两根Ic曲线横向平行移动49mV。也就是说,与定义导通Vbe的Ic无关,本发明的导通Vbe与以前相比低49mV。此变化是由图20所示的尖峰状能垒的高度为本发明的情况下降低了63mV所致(即,本发明的尖峰状能障的高度降低了63mV)。图22为表示导通Vbe与X的关系的图。Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$,Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$。随着X的增大、也就是第二InGaAs基区层240的厚度的增大而导通Vbe减小。图22中,将X为1nm至6nm的范围表示为“本发明”。其原因在于,1nm≦X≦6nm时可获得特别明显的特性改善,其具体说明将在图27的说明处描述。图23为表示导通Vbe与Np2/Np1比的关系的图。本图表示固定为Np1＝$4\times10^{19}cm^{-3}$的情况。因此,Np2/Np1＝0.25相当于Np2＝$1\times10^{19}cm^{-3}$。X为2nm。Np2/Np1＝1相当于实质上不存在第二InGaAs基区层240的、也就是现有的GaAsHBT的情况。导通Vbe随着Np2/Np1的减小而降低。图23中将Np2/Np1为0.5以下的点表示为“本发明”。其原因在于,Np2/Np1≦0.5时可获得特别

明显的特性改善,其具体说明将在图31的说明处描述。

[0114] 接下来,对图18及表2所示的GaAsHBT的通过二维器件模拟所计算的高频特性进行说明。图24为表示基区集电区间电容Cbc的集电区电流Ic依赖性的图。将集电区发射区间电压Vce固定为0.5V,为了获得Ic依赖性而使基区发射区间电压Vbe变化。Cbc的定义如上文所说明那样。虚线为X=0nm而不存在第二InGaAs基区层240的情况,也就是现有的GaAsHBT的情况。另一方面,实线为本发明的GaAsHBT的情况,本实施例中,第二InGaAs基区层240的厚度X为2nm,p型杂质浓度Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$。另外,第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$。图24所示的数据点的Ic为0.01A以上,全部进入图37所示的"低Vbe区域"。如由图21所得知那样,Ic成为0.01A以上的Vbe超过1.25V。另一方面,Vce为0.5V,因而Vbc为0.75V以上,也就是基区集电区间的pn接合处于高的顺向偏置状态。因此,图24中虚线所示的现有的GaAsHBT的情况下,随着Ic的增加、也就是顺向偏置增强,Cbc成为超过1pF的高值。相对于此,本发明的GaAsHBT的Cbc与以前相比大幅度地降低,Ic越高则降低程度越明显。其原因在于,由导通Vbe降低导致基区集电区间的顺向偏置变小。图25表示频率f0=2GHz时的最大功率放大率的Ic依赖性。与图24的Cbc同样地,集电区电压Vce为0.5V。纵轴记述为MSG/MAG,但其含意如上文所说明。图25中,曲线的斜率在Ic=0.05A处急剧变化,但0.05A以下为MSG区域,0.05A以上为MAG区域。图25中,实线为本发明的GaAsHBT,第二InGaAs基区层240的厚度X为2nm,p型杂质浓度Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$,第一InGaAs基区层230的p型杂质浓度Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$。与虚线所示的现有的GaAsHBT相比,无论在哪一电流时,MSG/MAG均高。这是由图24所示的Cbc的降低所致。Cbc在晶体管的功率放大中作为反馈电容发挥作用而使功率放大率降低。尤其在"低Vce区域"中,基区集电区间的pn接合成为强的顺向偏置状态,因此Cbc变得非常大,成为使功率放大率降低的要因。根据本发明,在"低Vce区域"中能够大幅度地降低Cbc,能够抑制此区域中的功率放大率的降低。图26为表示Cbc与X的关系的图,图27为表示最大功率放大率与X的关系的图。均为$Np1=4\times10^{19}cm^{-3}$,$Np2=1\times10^{19}cm^{-3}$的情况。Vce为0.5V。另外,黑圆点是Ic为0.072A时的值,黑三角是Ic为0.144A时的值。Ic=0.072A、0.144A均进入图37所示的"低Vce区域",但发射区的面积为360平方微米,因此若换算为发射区面的平均电流密度,则分别相当于$20kA/cm^2$、$40kA/cm^2$。图25中,Ic=0.072A、0.144A的任一情况下,最大功率放大率均成为MAG的区域,因此图27的纵轴是以MAG表示。图26及图27中表示为"现有"的X=0nm的数据点为不存在第二InGaAs基区层240的现有的GaAsHBT的情况。随着X变得大于0nm,Cbc减小而MAG增加。为了获得本发明的明显效果,优选Ic=0.072A($20kA/cm^2$)时MAG改善现有的1dB以上,Ic=0.144A($40kA/cm^2$)时MAG改善现有的2dB以上。因此,图27中将满足所述条件的$1nm\leqq X\leqq6nm$的范围表示为"本发明"。图22、图23、图26中也同样地将$1nm\leqq X\leqq6nm$的范围表示为"本发明"。此处,对图27的功率放大率(MAG)的X依赖性进行更详细说明。MAG随着X增加而开始增加,但当X为6nm以上时再次降低。图28表示与图27相同的条件下的|H21|2与X的关系的图。H21为H参数之一,表示RF运行时的电流放大率。黑圆点为Ic=0.072A时的值,黑三角为Ic=0.144A时的值,均是若X变大则降低。图29中表示X=8nm时的传导带能的深度依赖性。Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$,Np2为$1\times10^{19}cm^{-3}$。传导带能在第二InGaAs基区层240与第一InGaAs基区层230的界面显示急剧的上升,对于存在于第二InGaAs基区层240的电子来说成为能垒。由于所述基区层内能垒,电子蓄积在第二InGaAs基区层240内,电流的流动受阻。这导致|H21|2降低,甚至导致功率放大率降低。因此,即便第二InGaAs基区

层的厚度X过大也无法获得特性改善,作为满足上文所述的MAG的改善条件的条件,除了1nm≦X以外需要X≦6nm。最后对特性改善的Np2/Np1依赖性进行说明。图30、图31为分别表示Cbc、MAG与Np2/Np1的关系的图。均是X为2nm,Np1为$4\times10^{19}cm^{-3}$,Vce为0.5V。另外,黑圆点为Ic=0.072A的值,黑三角为Ic=0.144A的值。Np2/Np1=1为实质上不存在第二InGaAs基区层240的情况,相当于现有的GaAsHBT。随着Np2/Np1变得小于1,Cbc单调地减小,MAG单调地增加。再次,MAG在Ic=0.072A($20kA/cm^2$)时成为现有的1dB以上,在Ic=0.144A($40kA/cm^2$)时成为现有的2dB以上,可获得由本发明所得的明显改善的条件成为图31中表示为“本发明”的0≦Np2/Np1≦0.5的范围。所述条件也示于图30。

[0115] 在将本申请第二发明的GaAsHBT用于功率放大器时,也可根据“低Vce区域”的功率放大率的提高程度而与本申请第一发明同样地获得功率附加效率PAE等作为功率放大器的特性的改善,尤其能够在如包络线追踪型放大器那样以功率饱和区域运行的功率放大器中大幅度地改善特性。

[0116] 也可将本申请第一发明与本申请第二发明组合。图32为在图18、表2所示的本申请第二发明中,将发射区层250替换为本申请第一发明的第一发射区层150时的通过二维器件模拟所得的传导带的带能的深度依赖性。第一发射区层为具有CuPt型秩序的Eg=1.85eV的InGaP。Np1=$4\times10^{19}cm^{-3}$,Np2=$1\times10^{19}cm^{-3}$,X=2nm。虚线为图4、图20中也示出的现有的GaAsHBT的情况,尖峰状能垒高度为105meV。相对于此,将本申请第一发明与本申请第二发明组合的本实施例中,如实线所示那样,尖峰状能垒的高度大致成为零。图33为与图21同样的绘图。与虚线所示的现有的GaAsHBT相比,实线所示的本实施例中,Ic变大而向低电压侧偏移,实现83mV的导通Vbe降低。图34、图35分别表示Cbc、功率放大率(MSG/MAG)的Ic依赖性。Vce为0.5V。Cbc、MSG/MAG的定义如上文所说明那样。与由虚线所示的现有的GaAsHBT相比,本实施例中,通过Cbc的大幅度降低而获得MSG/MAG的大幅度改善。

[0117] 在将组合本申请第一发明与本申请第二发明而得的GaAsHBT用于功率放大器时,也可根据“低Vce区域”的功率放大率的提高程度而与本申请第一发明同样地获得功率附加效率PAE等作为功率放大器的特性的改善,尤其能够在如包络线追踪型放大器那样以功率饱和区域运行的功率放大器中大幅度地改善特性。

[0118] [产业上的可利用性]

[0119] 本申请第一发明以及第二发明的GaAsHBT可广泛地用作以无线通信用功率放大器为代表的高频放大器用晶体管。


发射区接触层
160
第一发射区层
150
InGaAs 基区层
130
集电区层
120
子集电区层
110
GaAs 基板
100

图1

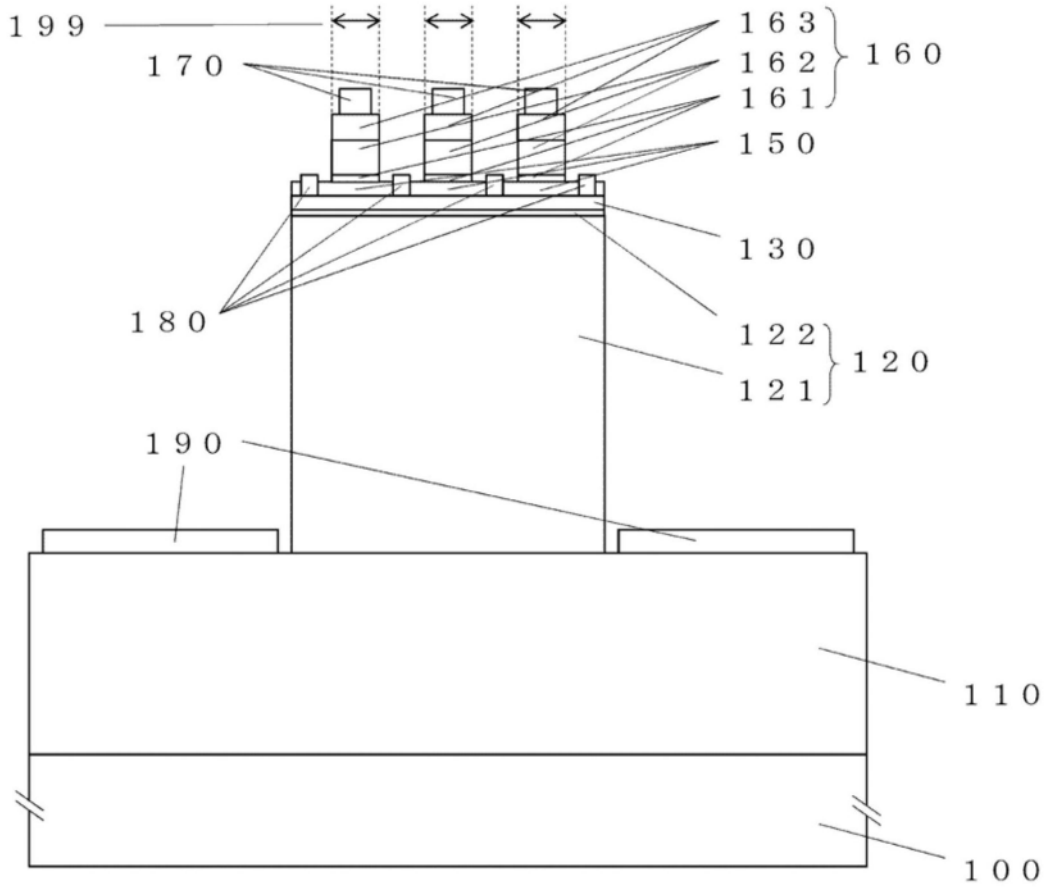


图2

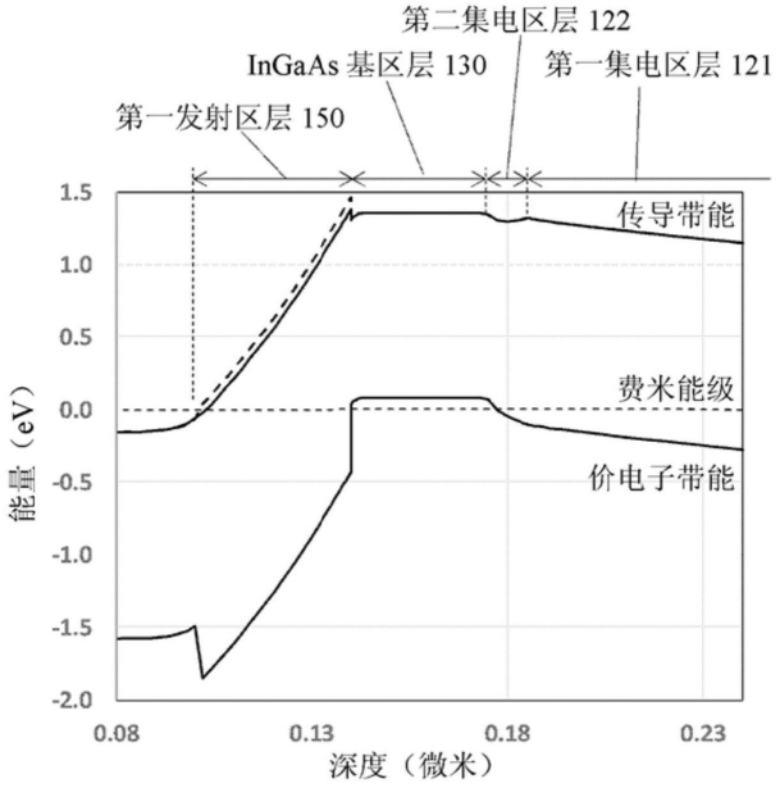

第二集电区层 122
InGaAs 基区层 130
第一集电区层 121
第一发射区层 150
传导带能
费米能级
价电子带能
能量（eV）
深度（微米）
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
-2.0
0.08
0.13
0.18
0.23

图3

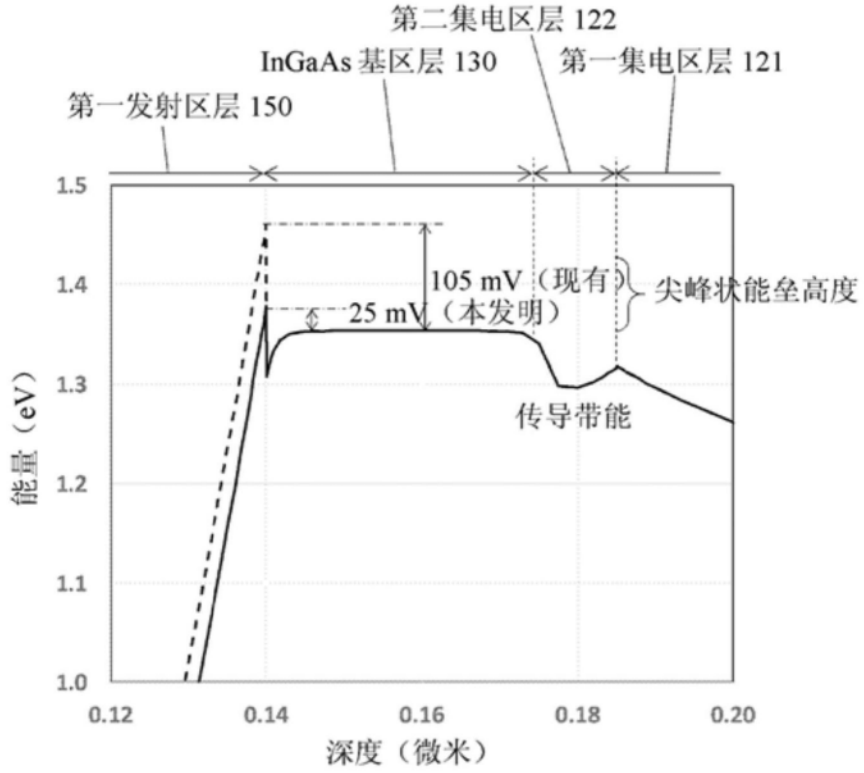

第二集电区层 122
InGaAs 基区层 130
第一集电区层 121
第一发射区层 150
105 mV（现有）
25 mV（本发明）
尖峰状能垒高度
传导带能
能量（eV）
深度（微米）
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1.0
0.12
0.14
0.16
0.18
0.20

图4

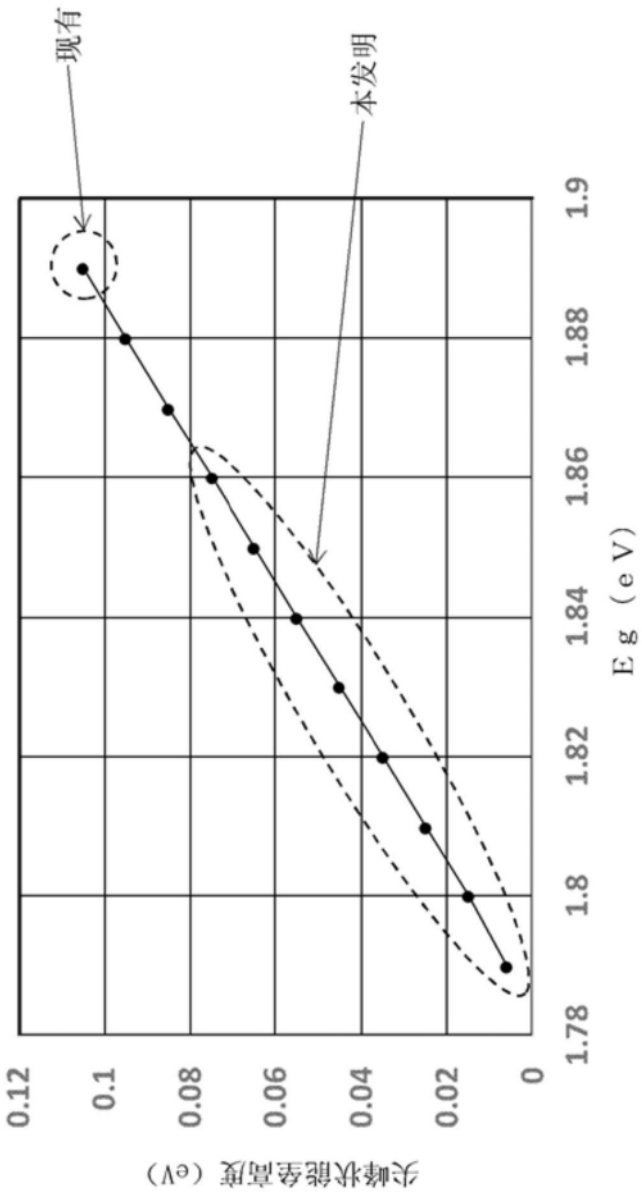

现有
本发明
1.9
1.88
1.86
1.84
1.82
1.8
1.78
Eg（eV）
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
尖峰状能垒高度（eV）

图5

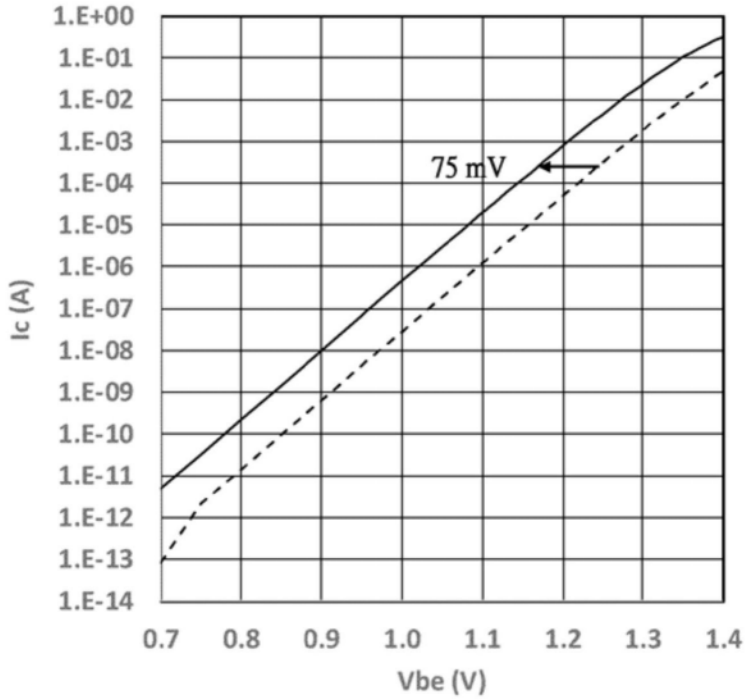

1.E+00
1.E-01
1.E-02
1.E-03
1.E-04
1.E-05
1.E-06
1.E-07
1.E-08
1.E-09
1.E-10
1.E-11
1.E-12
1.E-13
1.E-14
Ic (A)
75 mV
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
Vbe (V)

图6

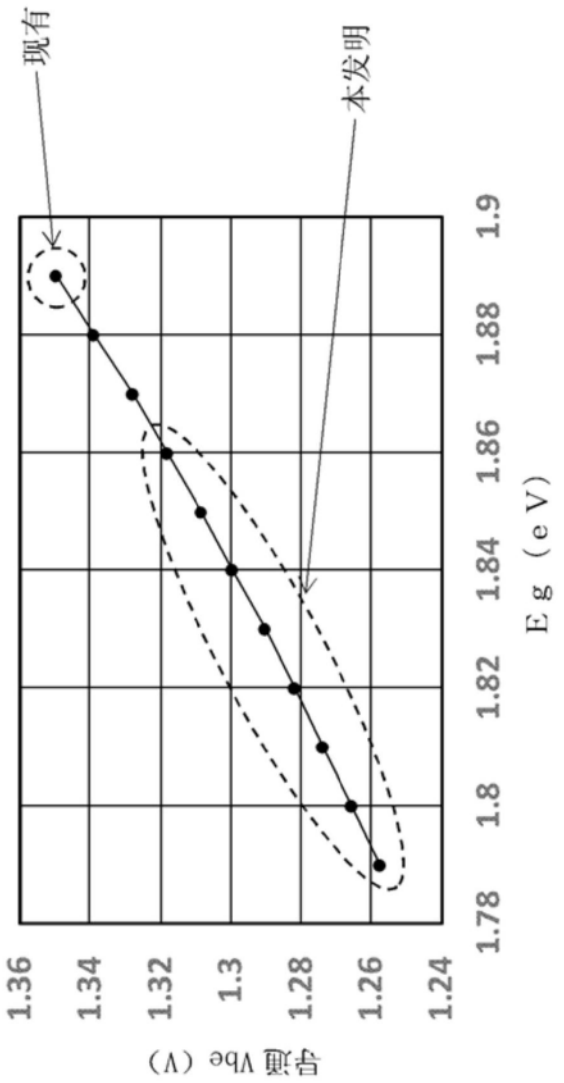

现有
本发明
1.9
1.88
1.86
1.84
1.82
1.8
1.78
Eg（eV）
1.36
1.34
1.32
1.3
1.28
1.26
1.24
导通 Vbe（V）

图7

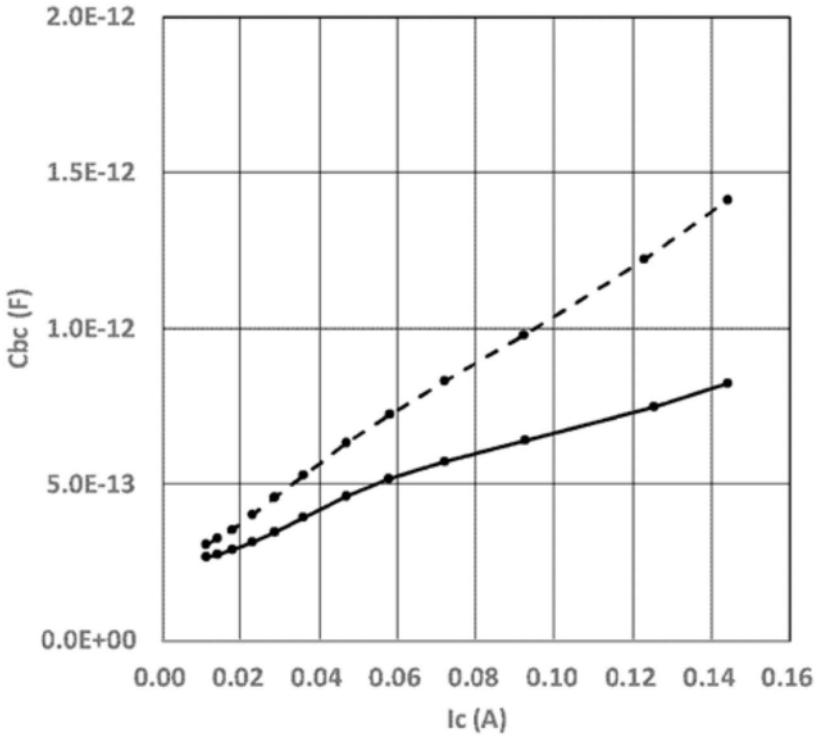

2.0E-12
1.5E-12
1.0E-12
5.0E-13
0.0E+00
Cbc (F)
0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16
Ic (A)

图8

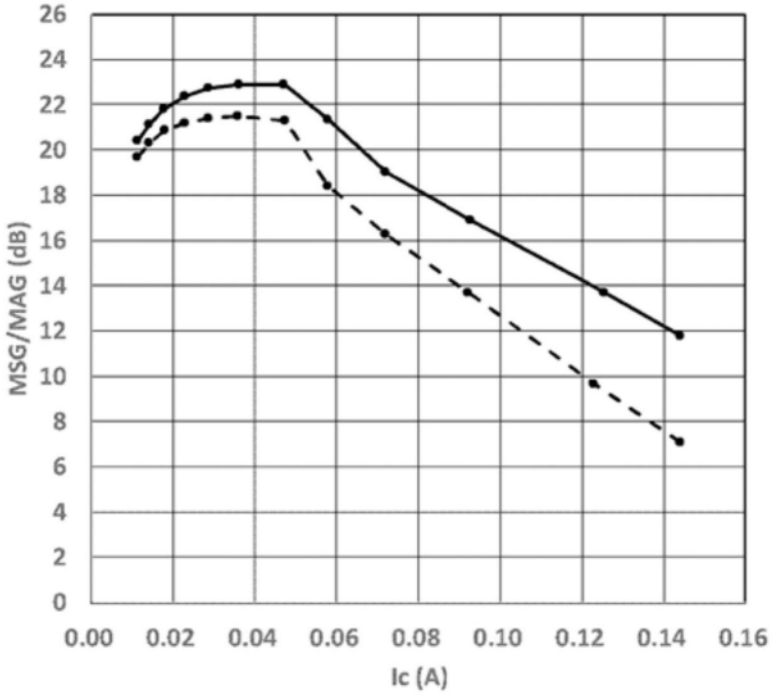

26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
MSG/MAG (dB)
0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16
Ic (A)

图9

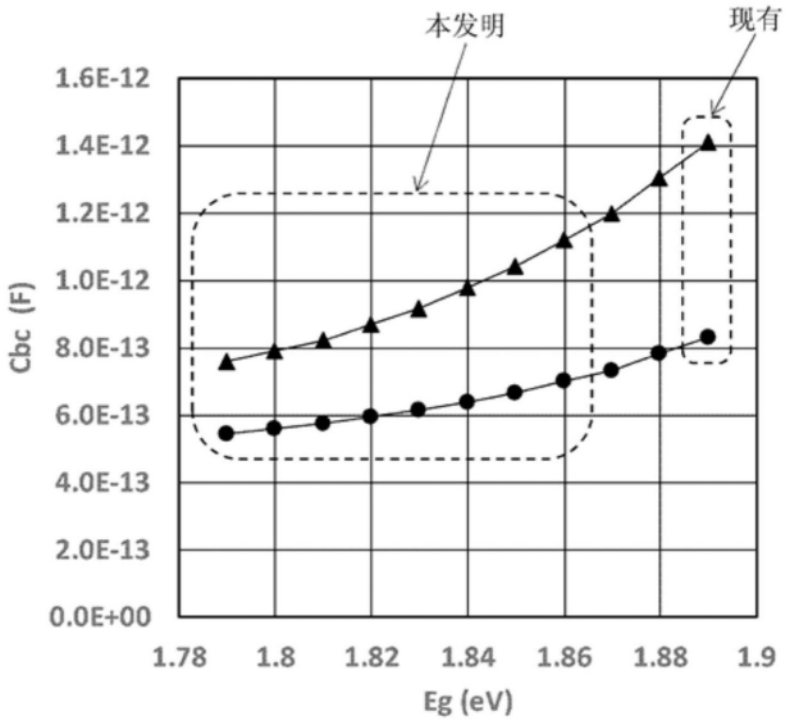

本发明
现有
1.6E-12
1.4E-12
1.2E-12
1.0E-12
8.0E-13
6.0E-13
4.0E-13
2.0E-13
0.0E+00
Cbc (F)
1.78
1.8
1.82
1.84
1.86
1.88
1.9
Eg (eV)

图10

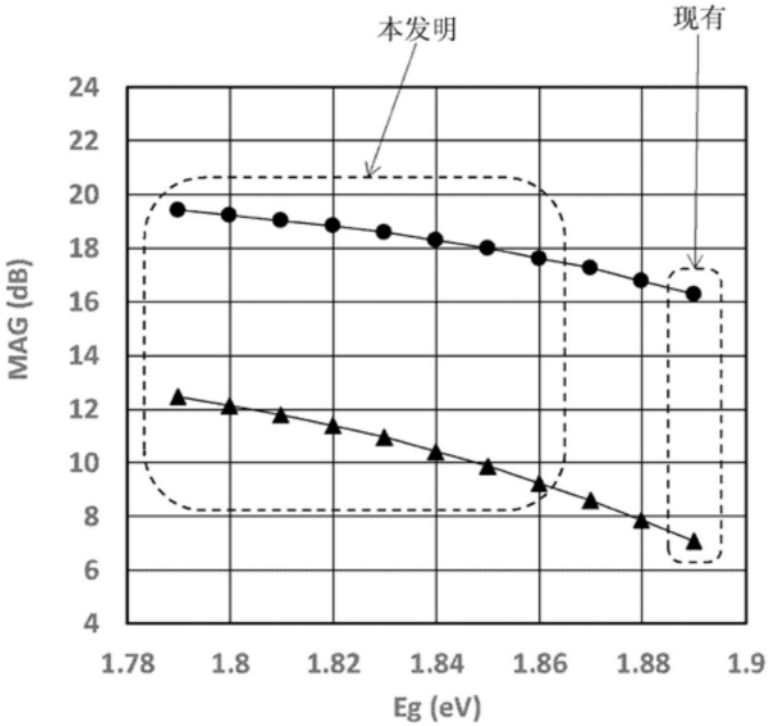

本发明
现有
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
MAG (dB)
1.78
1.8
1.82
1.84
1.86
1.88
1.9
Eg (eV)

图11

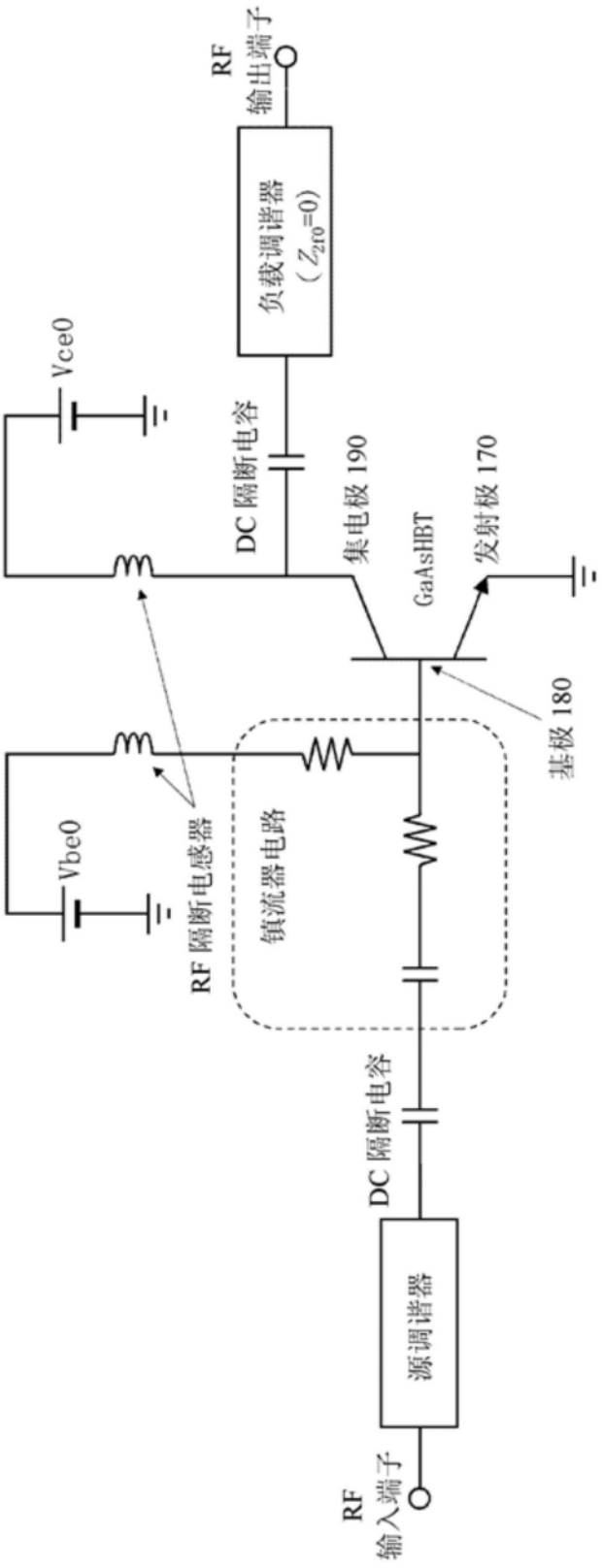

RF
输出端子
负载调谐器
(Z_{2r0}=0)
Vce0
DC 隔断电容
集电极 190
GaAsHBT
发射极 170
基极 180
Vbe0
RF 隔断电感器
镇流器电路
DC 隔断电容
源调谐器
RF
输入端子

图12

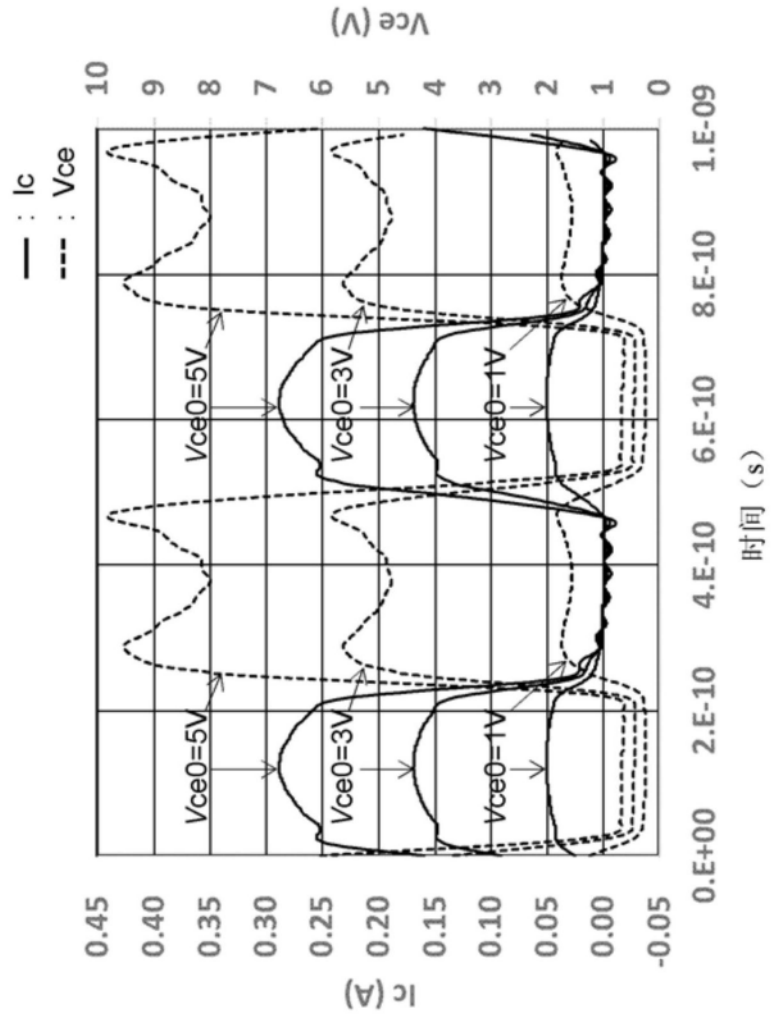

Vce (V)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
Ic
Vce
Vce0=5V
Vce0=3V
Vce0=1V
Vce0=5V
Vce0=3V
Vce0=1V
0.E+00
2.E-10
4.E-10
6.E-10
8.E-10
1.E-09
时间（s）
Ic (A)
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
-0.05

图13

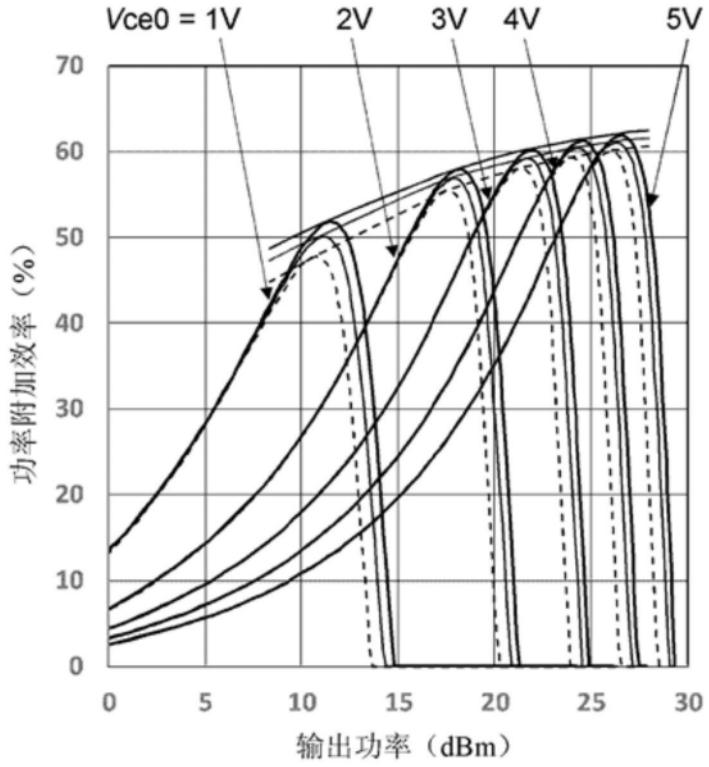

Vce0 = 1V
2V
3V
4V
5V
功率附加效率（%）
输出功率（dBm）
0
10
20
30
40
50
60
70
0
5
10
15
20
25
30

图14

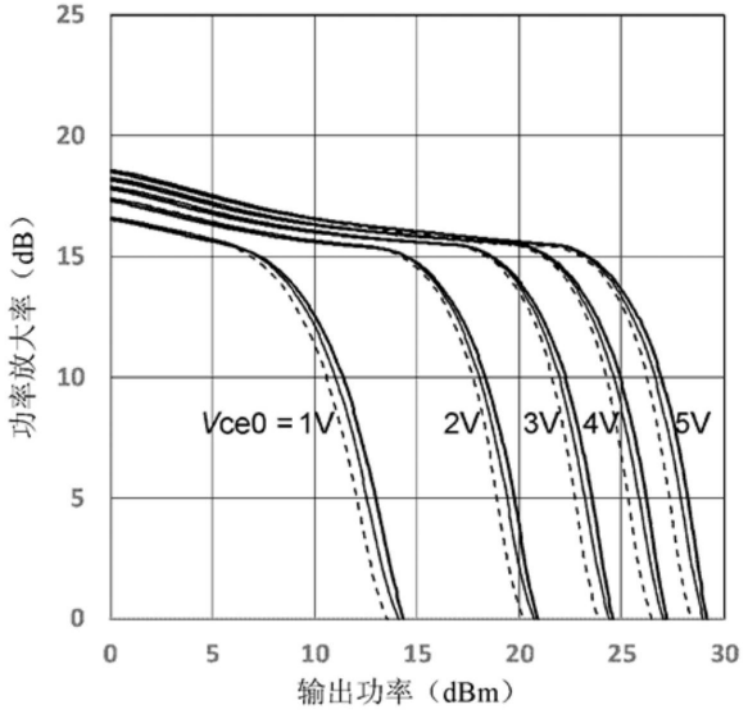

功率放大率（dB）
输出功率（dBm）
Vce0 = 1V
2V
3V
4V
5V
0
5
10
15
20
25
0
5
10
15
20
25
30

图15


发射区接触层
160
第二发射区层
151
第一发射区层
150
InGaAs 基区层
130
集电区层
120
子集电区层
110
GaAs 基板
100

图16

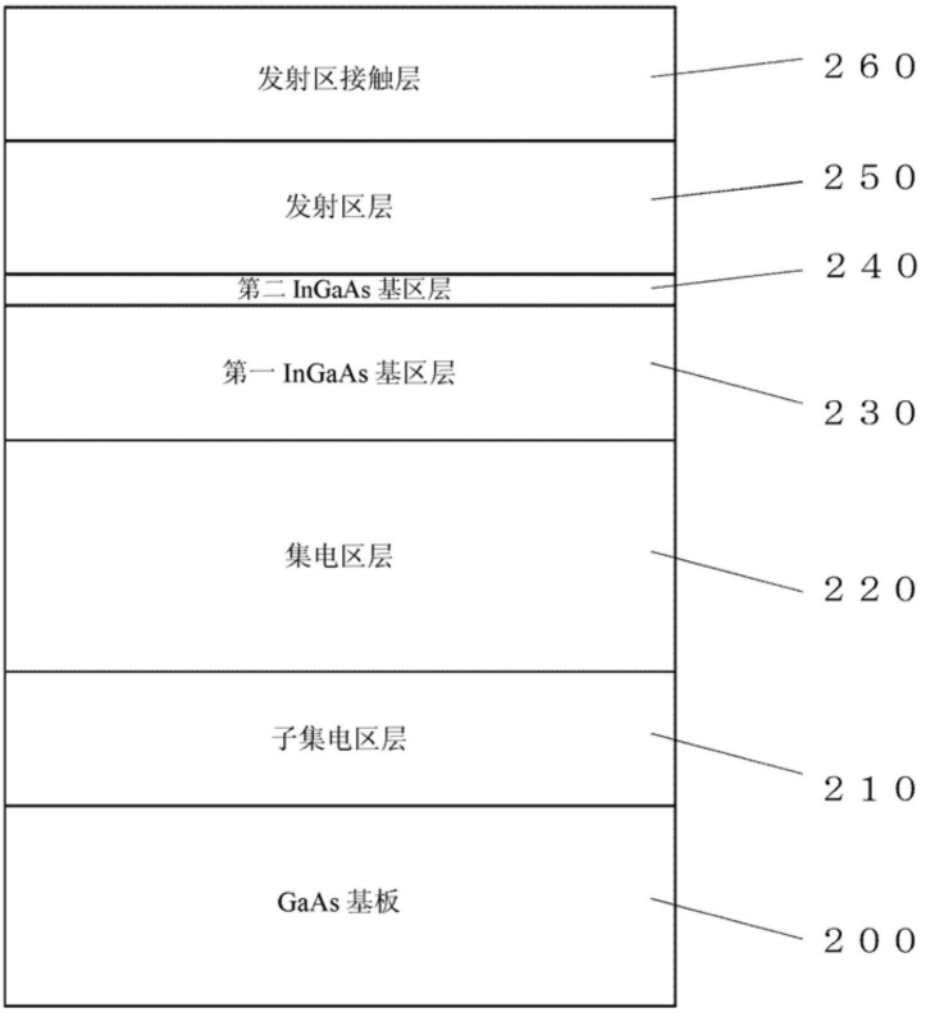

发射区接触层
260
发射区层
250
第二 InGaAs 基区层
240
第一 InGaAs 基区层
230
集电区层
220
子集电区层
210
GaAs 基板
200

图17

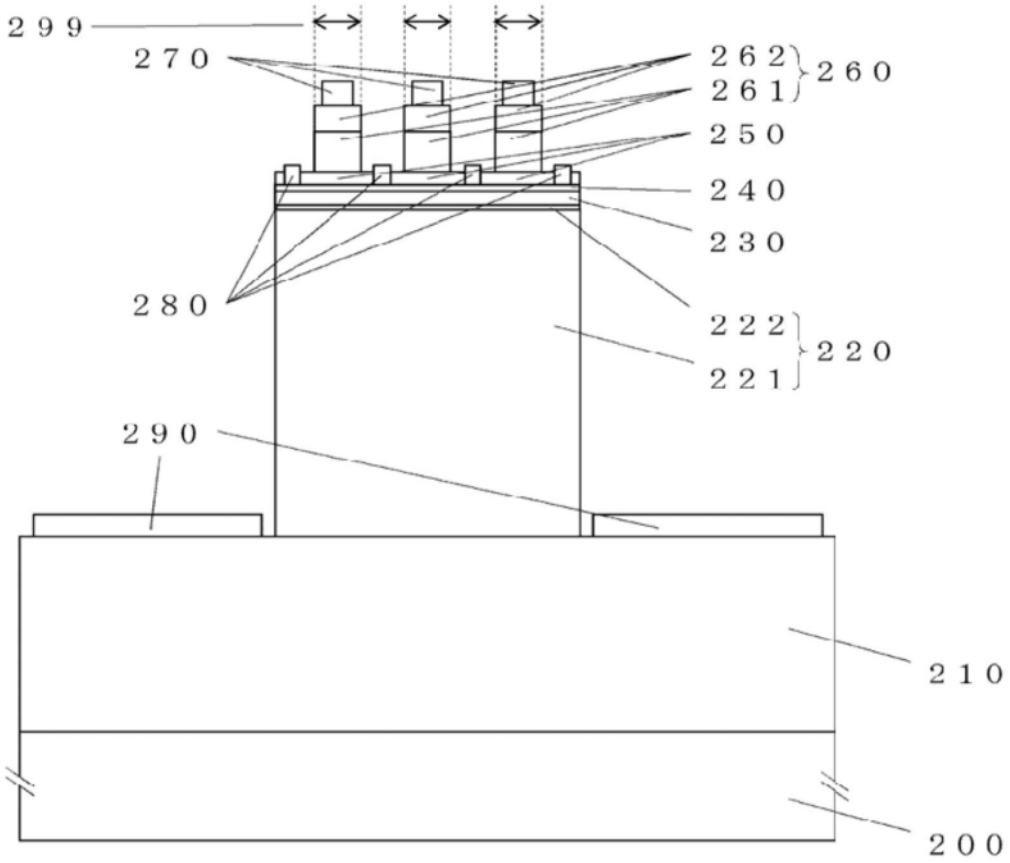


图18

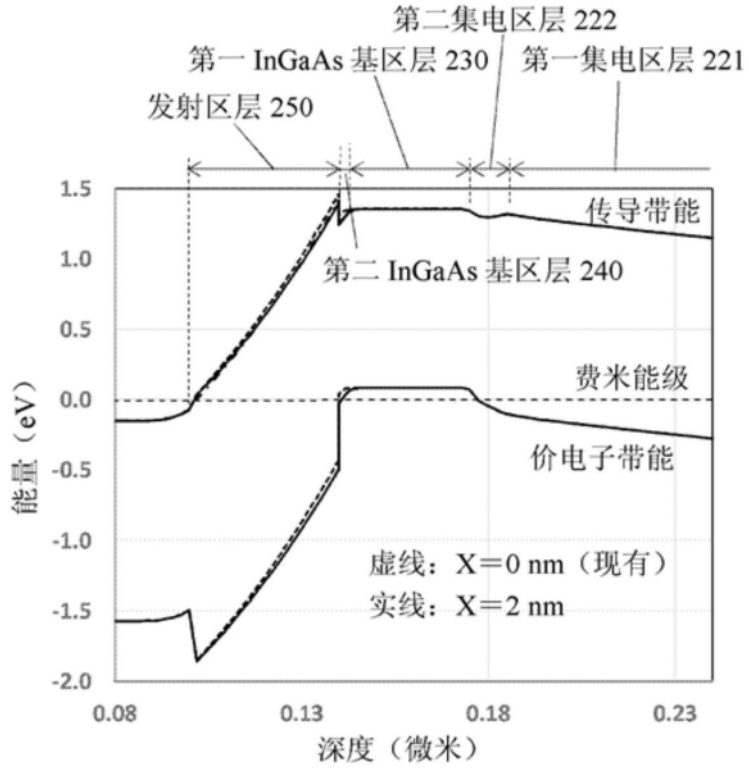

第二集电区层 222
第一 InGaAs 基区层 230
第一集电区层 221
发射区层 250
传导带能
第二 InGaAs 基区层 240
费米能级
价电子带能
虚线：X＝0 nm（现有）
实线：X＝2 nm
能量（eV）
深度（微米）
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
-2.0
0.08
0.13
0.18
0.23

图19

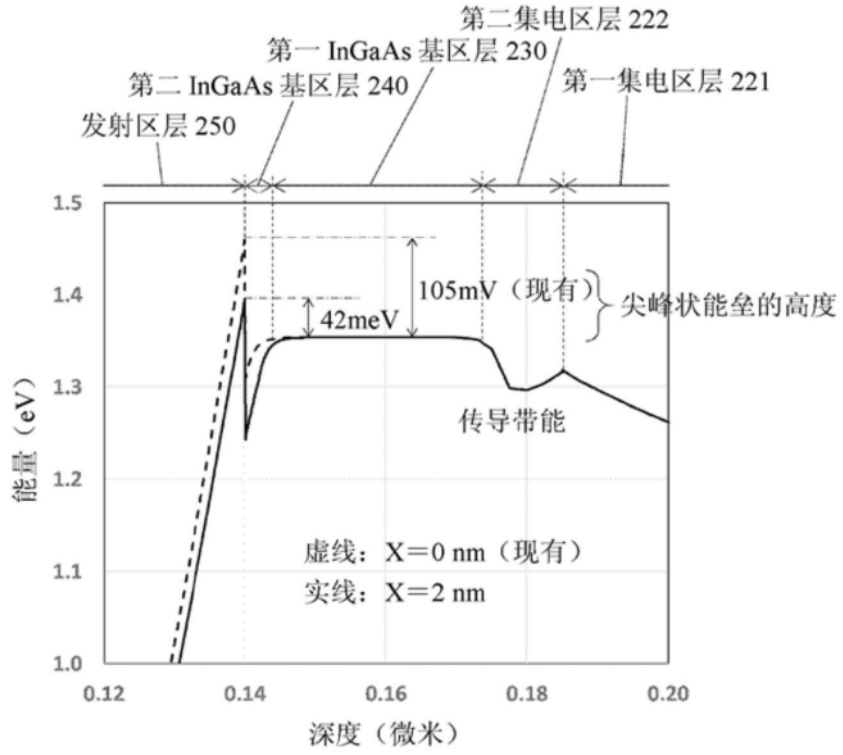

第二集电区层 222
第一 InGaAs 基区层 230
第二 InGaAs 基区层 240
第一集电区层 221
发射区层 250
105mV（现有）
尖峰状能垒的高度
42meV
传导带能
虚线：X＝0 nm（现有）
实线：X＝2 nm
能量（eV）
深度（微米）
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1.0
0.12
0.14
0.16
0.18
0.20

图20

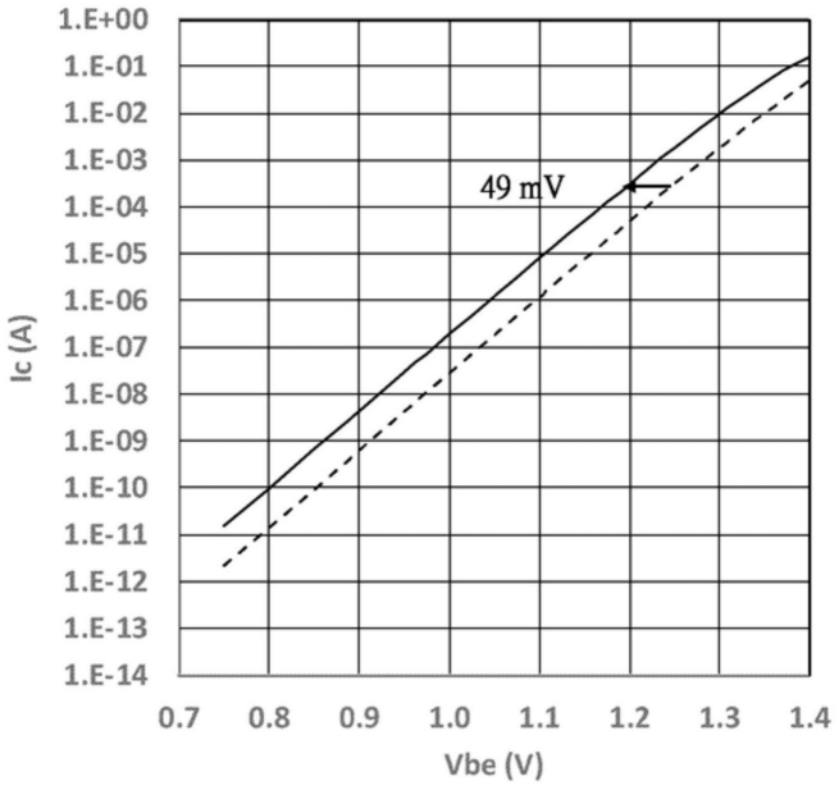

1.E+00
1.E-01
1.E-02
1.E-03
1.E-04
1.E-05
1.E-06
1.E-07
1.E-08
1.E-09
1.E-10
1.E-11
1.E-12
1.E-13
1.E-14
Ic (A)
49 mV
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
Vbe (V)

图21

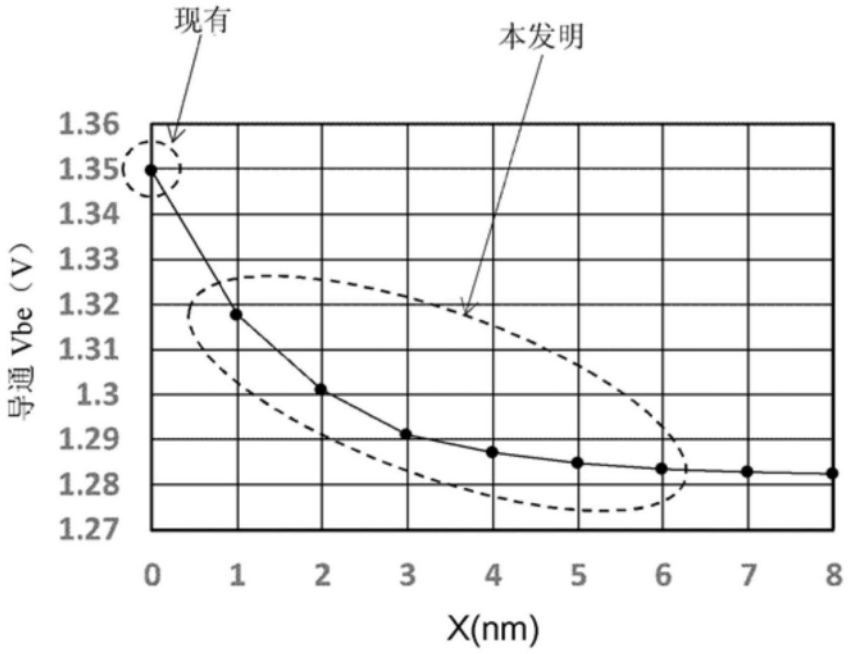

现有
本发明
1.36
1.35
1.34
1.33
1.32
1.31
1.3
1.29
1.28
1.27
导通 Vbe（V）
0
1
2
3
4
5
6
7
8
X(nm)

图22

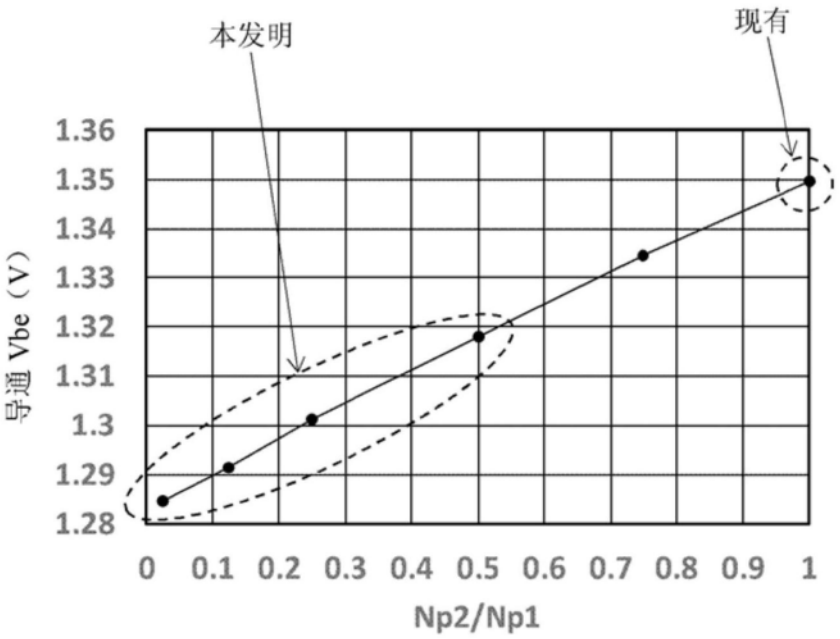

本发明
现有
1.36
1.35
1.34
1.33
1.32
1.31
1.3
1.29
1.28
导通 Vbe（V）
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
Np2/Np1

图23

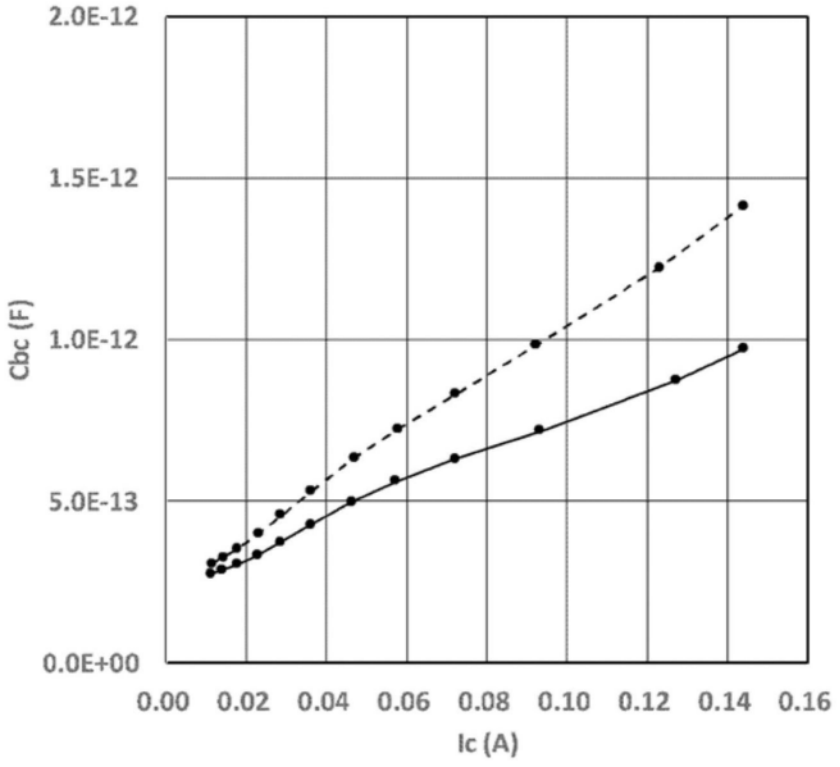

2.0E-12
1.5E-12
1.0E-12
5.0E-13
0.0E+00
Cbc (F)
0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16
Ic (A)

图24

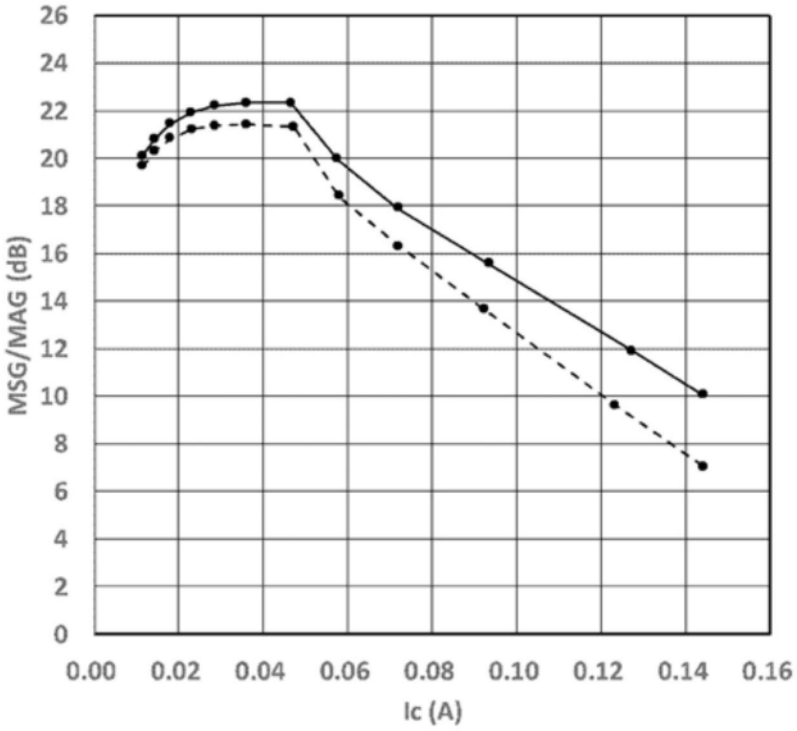

MSG/MAG (dB)
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14
0.16
Ic (A)

图25

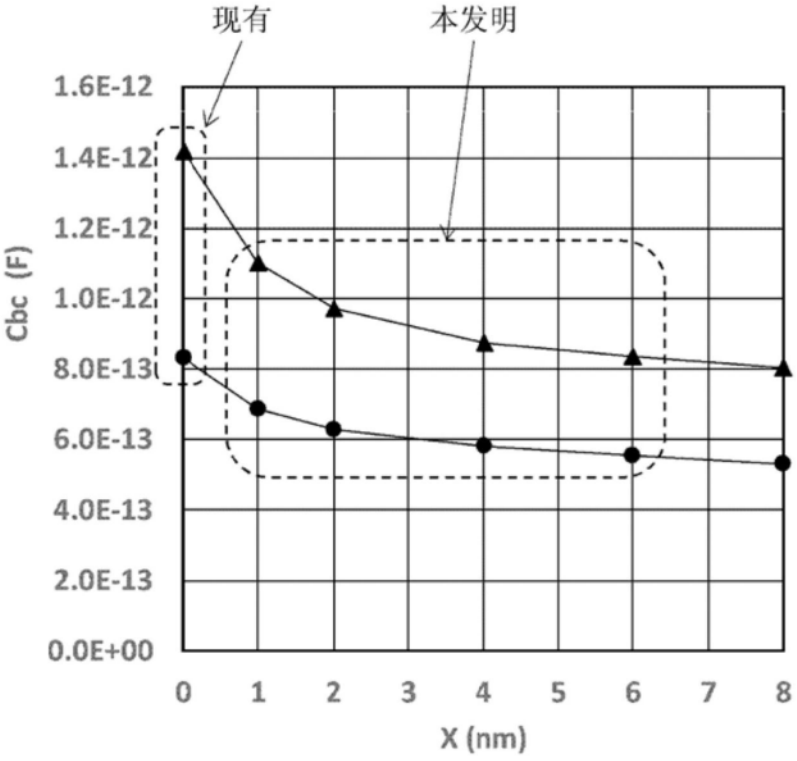

现有
本发明
Cbc (F)
1.6E-12
1.4E-12
1.2E-12
1.0E-12
8.0E-13
6.0E-13
4.0E-13
2.0E-13
0.0E+00
0
1
2
3
4
5
6
7
8
X (nm)

图26

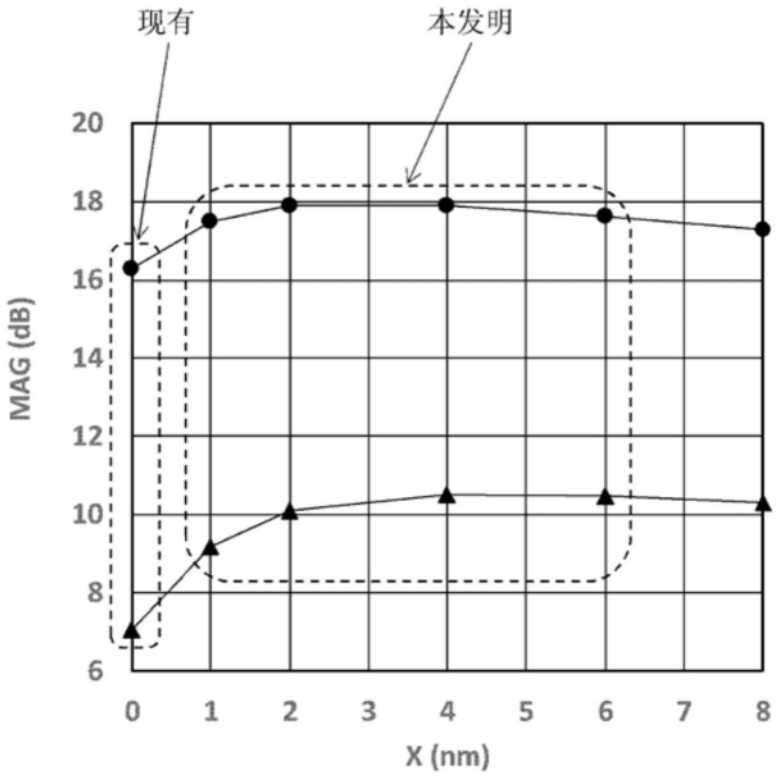

现有
本发明
MAG (dB)
20
18
16
14
12
10
8
6
0
1
2
3
4
5
6
7
8
X (nm)

图27

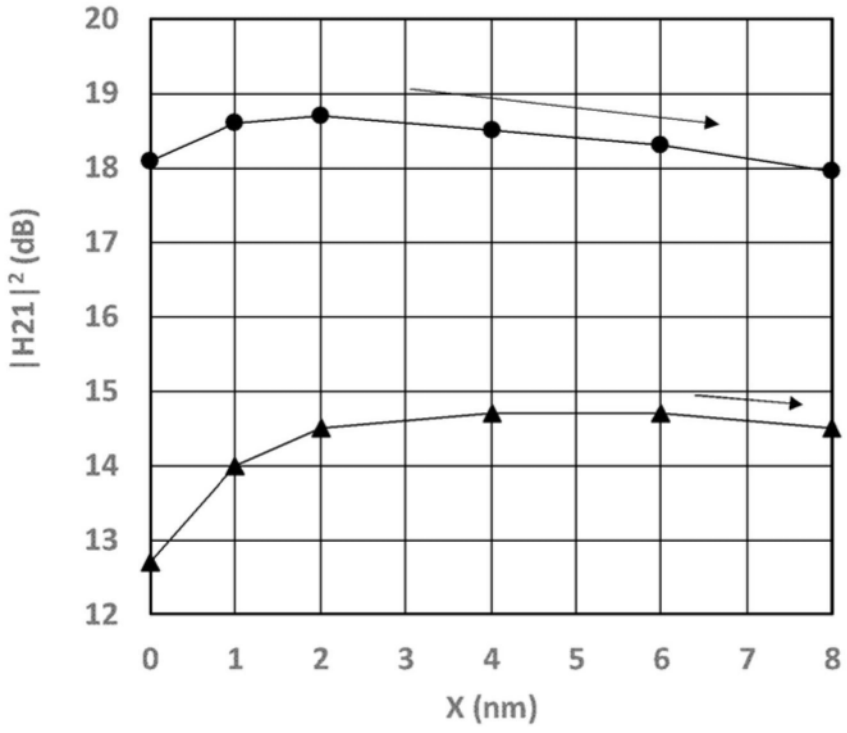

|H21|² (dB)
20
19
18
17
16
15
14
13
12
0
1
2
3
4
5
6
7
8
X (nm)

图28

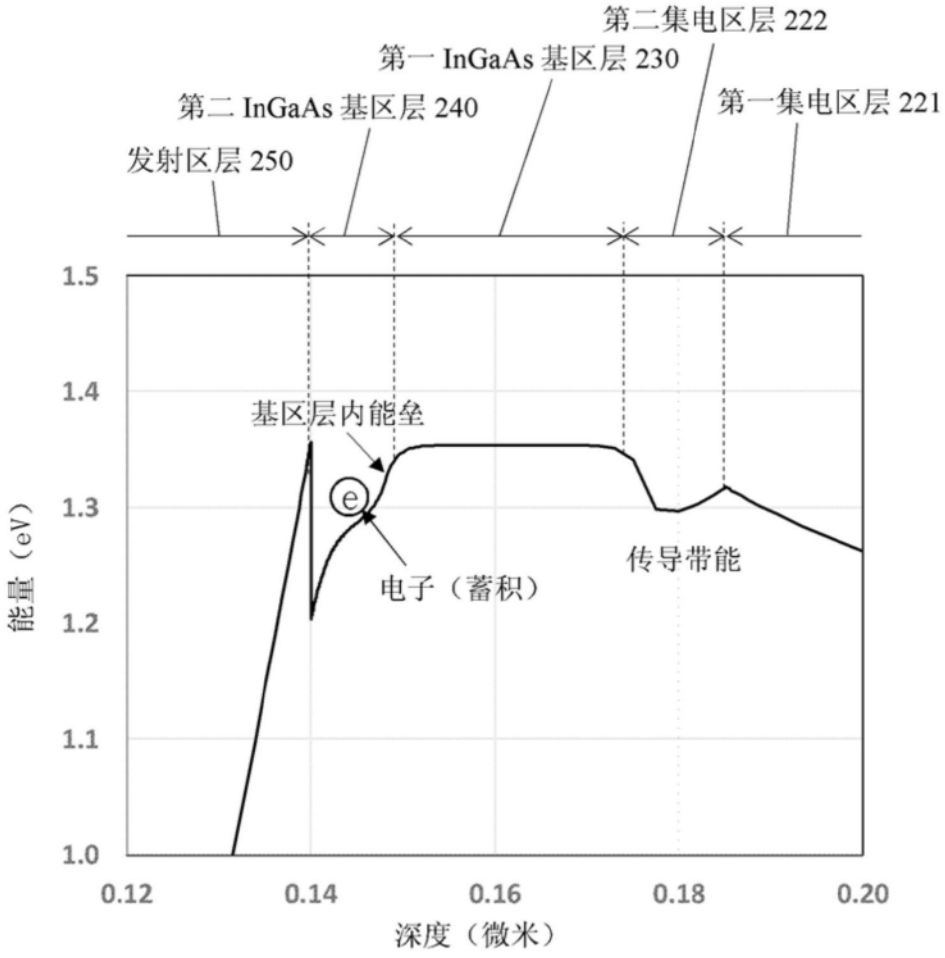

第二集电区层 222
第一 InGaAs 基区层 230
第二 InGaAs 基区层 240
第一集电区层 221
发射区层 250
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1.0
能量（eV）
基区层内能垒
e
电子（蓄积）
传导带能
0.12
0.14
0.16
0.18
0.20
深度（微米）

图29

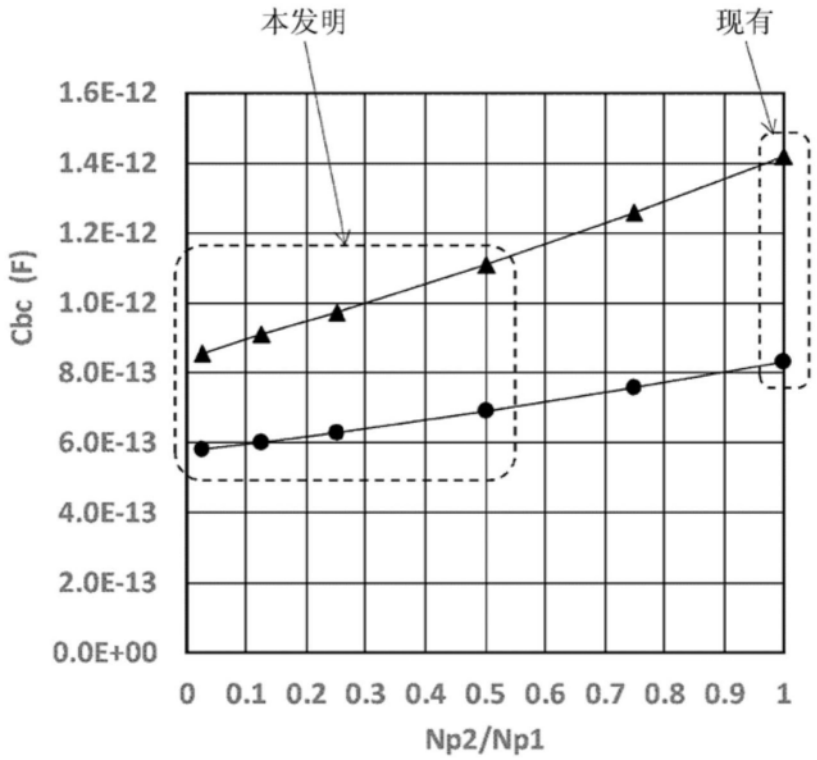

本发明
现有
1.6E-12
1.4E-12
1.2E-12
1.0E-12
8.0E-13
6.0E-13
4.0E-13
2.0E-13
0.0E+00
Cbc (F)
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
Np2/Np1

图30

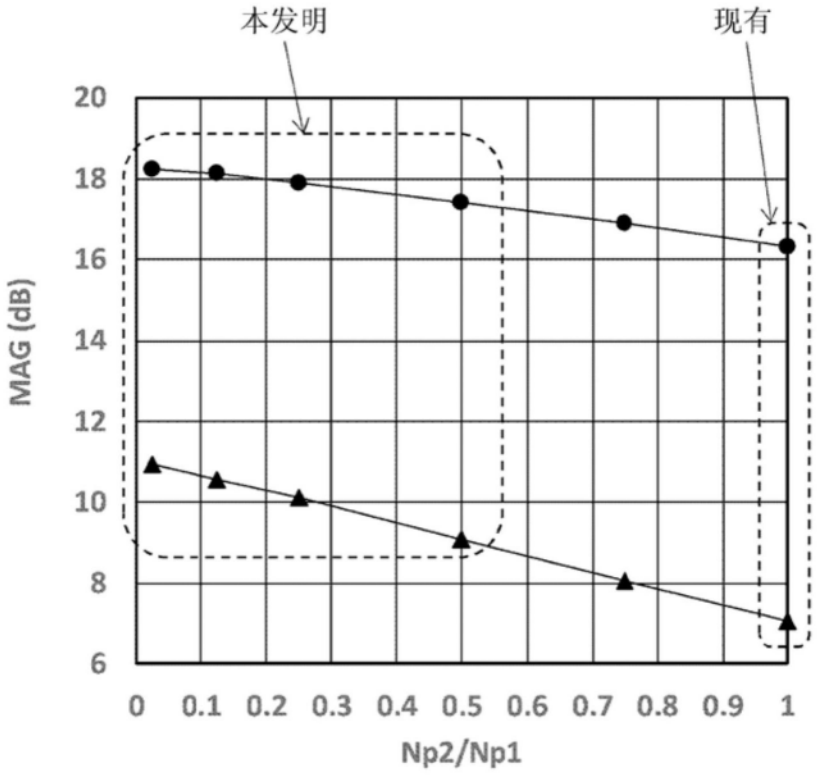

本发明
现有
20
18
16
14
12
10
8
6
MAG (dB)
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
Np2/Np1

图31

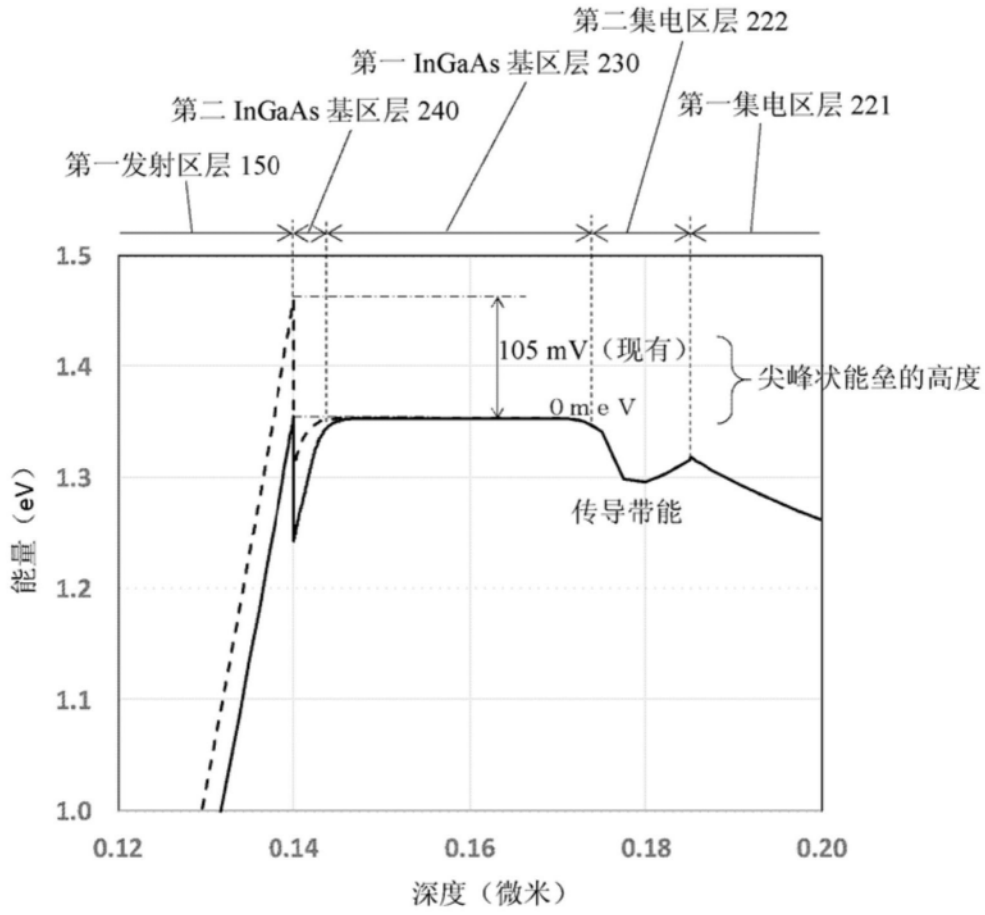

第二集电区层 222
第一 InGaAs 基区层 230
第二 InGaAs 基区层 240
第一集电区层 221
第一发射区层 150
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1.0
能量（eV）
105 mV（现有）
0 m e V
尖峰状能垒的高度
传导带能
0.12
0.14
0.16
0.18
0.20
深度（微米）

图32

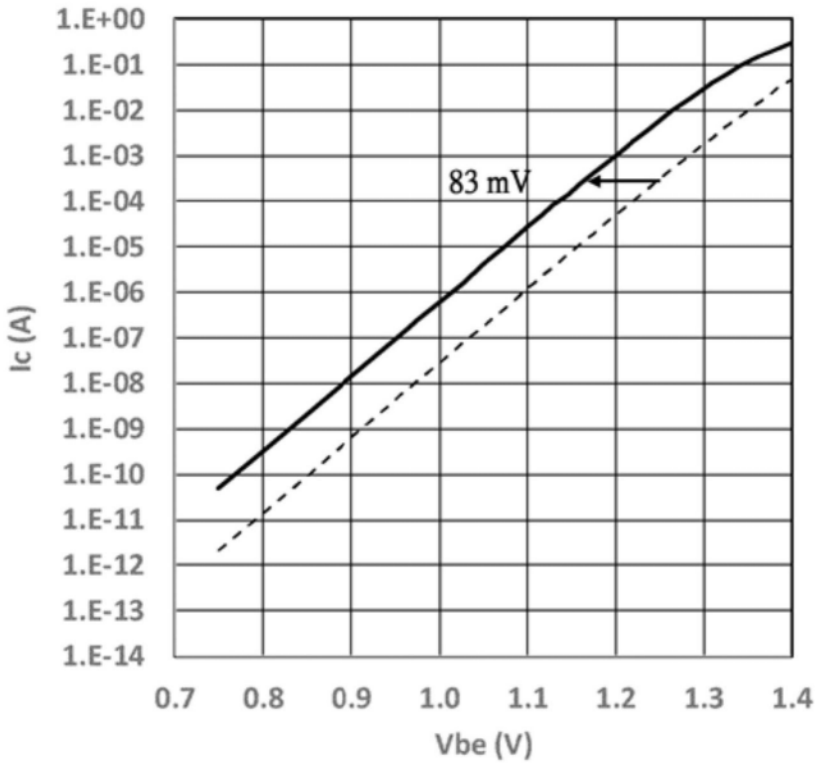

1.E+00
1.E-01
1.E-02
1.E-03
1.E-04
1.E-05
1.E-06
1.E-07
1.E-08
1.E-09
1.E-10
1.E-11
1.E-12
1.E-13
1.E-14
Ic (A)
83 mV
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
Vbe (V)

图33

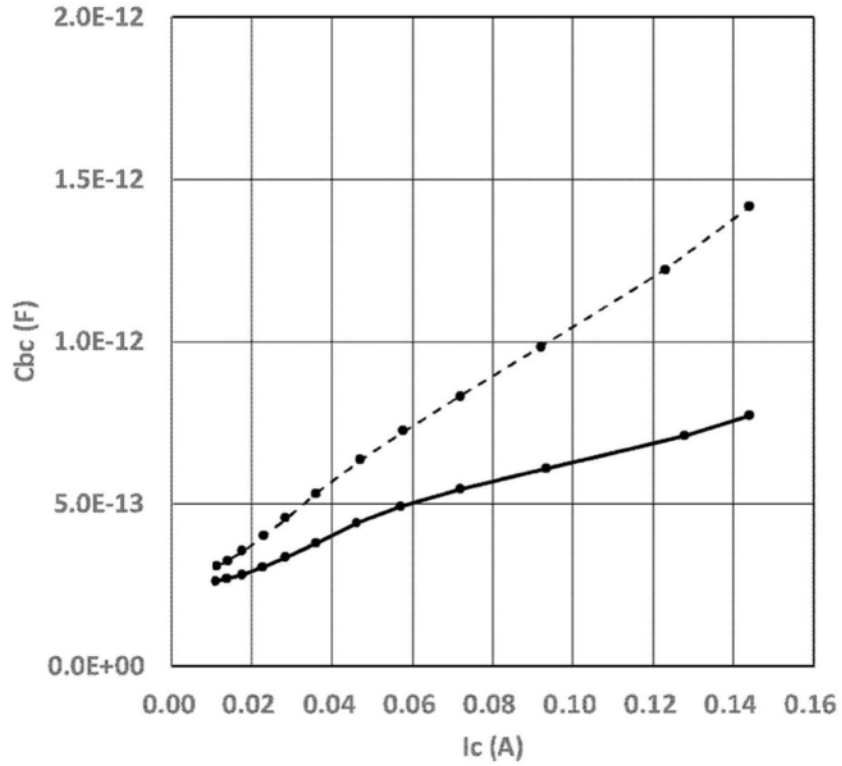

2.0E-12
1.5E-12
1.0E-12
5.0E-13
0.0E+00
Cbc (F)
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14
0.16
Ic (A)

图34

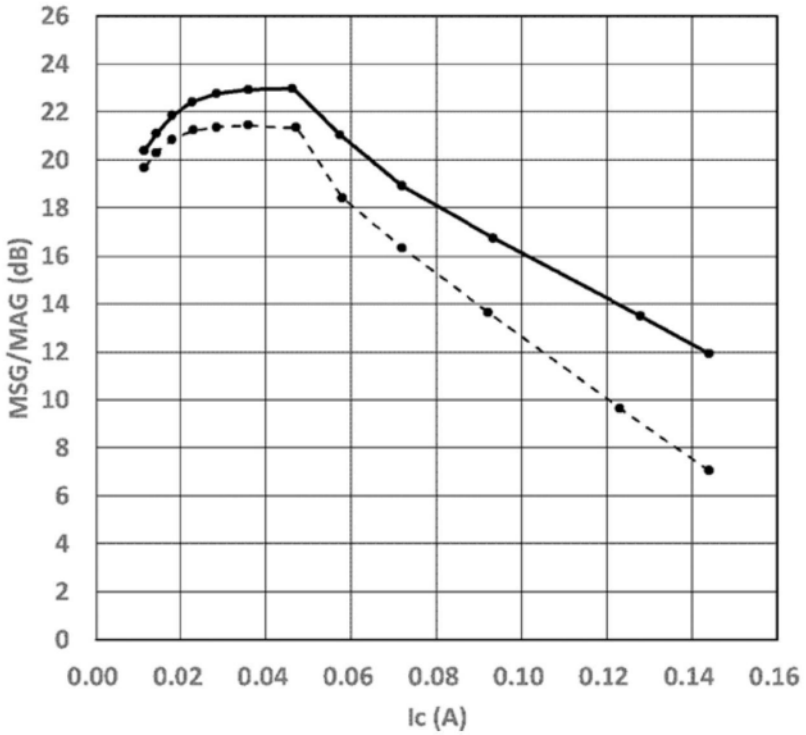

MSG/MAG (dB)
Ic (A)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14
0.16

图35

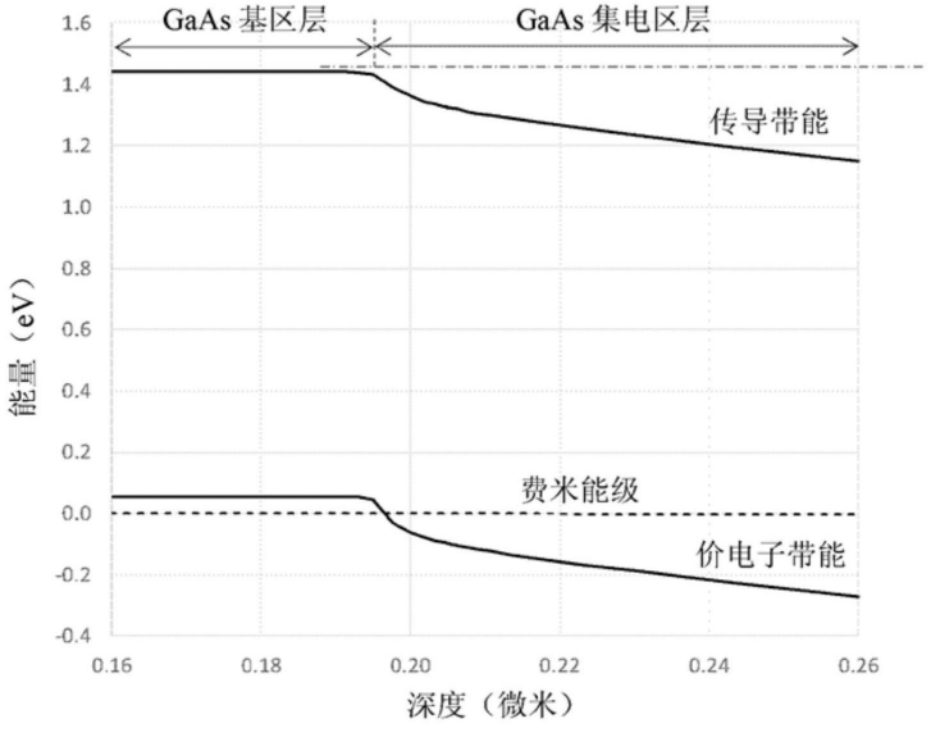

GaAs 基区层
GaAs 集电区层
传导带能
费米能级
价电子带能
能量（eV）
深度（微米）
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
0.16
0.18
0.20
0.22
0.24
0.26

图36(a)

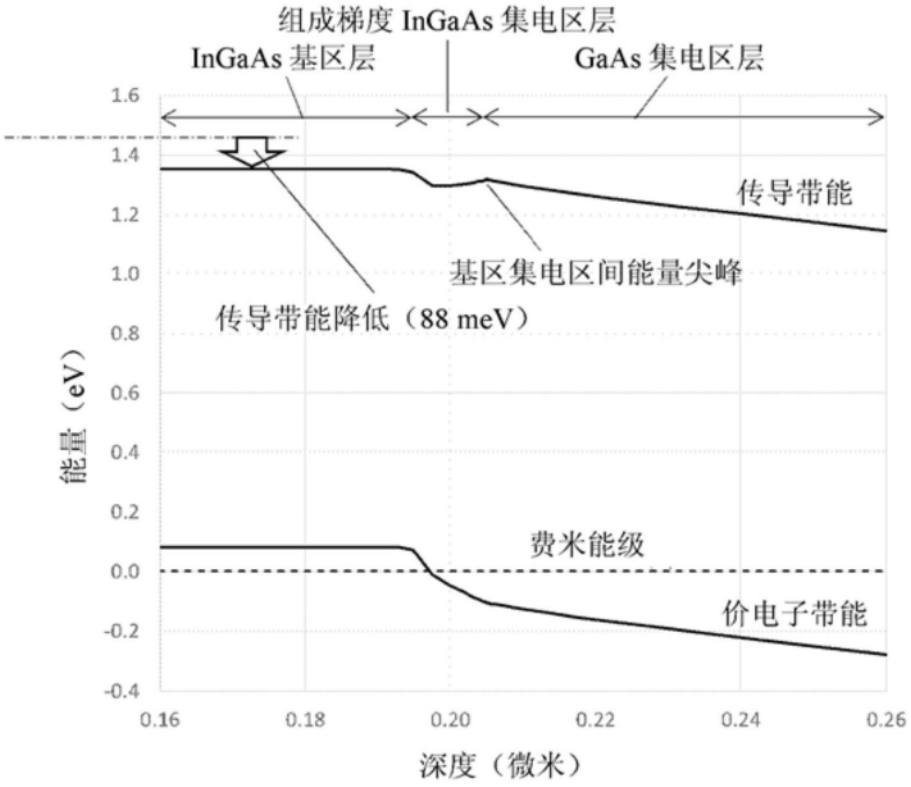

组成梯度 InGaAs 集电区层
InGaAs 基区层
GaAs 集电区层
传导带能
基区集电区间能量尖峰
传导带能降低（88 meV）
费米能级
价电子带能
能量（eV）
深度（微米）
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
0.16
0.18
0.20
0.22
0.24
0.26

图36(b)

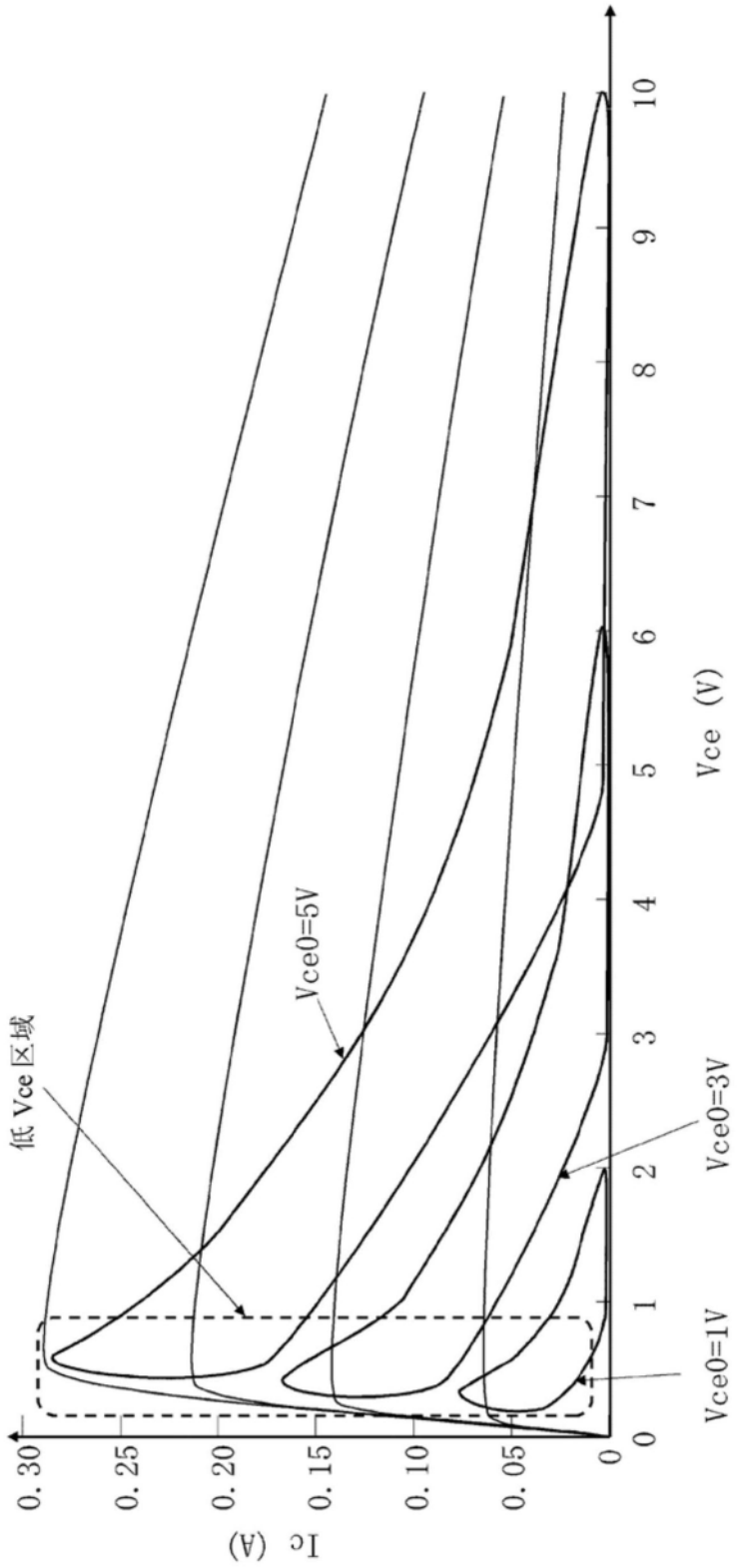

低 Vce 区域
Vce0=5V
Vce0=3V
Vce0=1V
Vce (V)
Ic (A)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0

图37

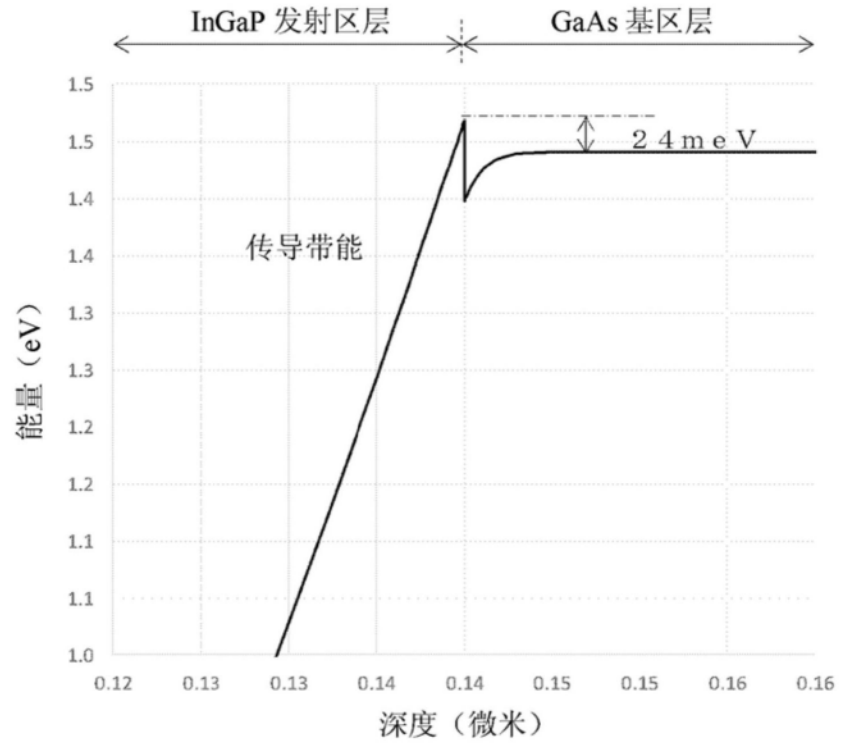

InGaP 发射区层
GaAs 基区层
24meV
传导带能
能量（eV）
深度（微米）

图38(a)

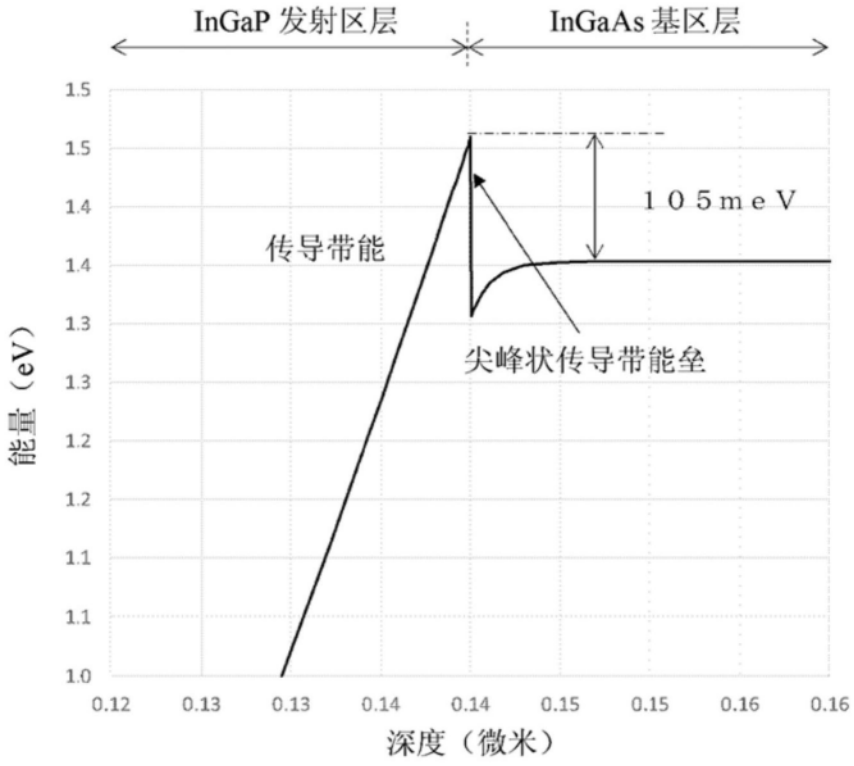

InGaP 发射区层
InGaAs 基区层
105meV
传导带能
尖峰状传导带能垒
能量（eV）
深度（微米）

图38(b)