

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 6 月 27 日 (27.06.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/119264 A1

(51) 国际专利分类号:
G05F 1/56 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/117136

(22) 国际申请日: 2017 年 12 月 19 日 (19.12.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 深圳市汇顶科技股份有限公司 (SHENZHEN GOODIX TECHNOLOGY CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区保税区腾飞工业大厦 B 座 13 层, Guangdong 518045 (CN)。

(72) 发明人: 李亮 (LI, Liang); 中国广东省深圳市福田区保税区腾飞工业大厦 B 座 13 层, Guangdong 518045 (CN)。

(74) 代理人: 北京合智同创知识产权代理有限公司 (BEIJING HEADSTAY INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华杰大厦 5A1-2, Beijing 100098 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: LOW DROPOUT LINEAR VOLTAGE REGULATOR CIRCUIT

(54) 发明名称: 低压差线性稳压电路

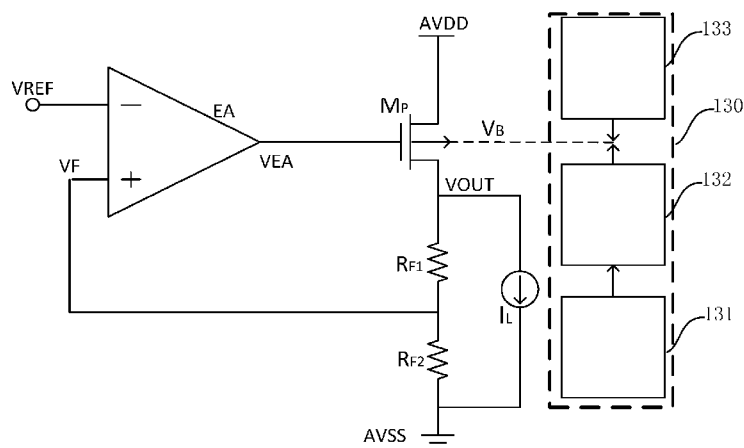


图 3

(57) Abstract: A low dropout linear voltage regulator circuit. The low dropout linear voltage regulator circuit comprises: an output voltage detection circuit (110), used for detecting output voltage of the low dropout linear voltage regulator circuit, and generating a corresponding feedback voltage (VF); an error amplification circuit (120), used for comparing the feedback voltage (VF) with a reference voltage (VREF), and generating a corresponding error voltage (VEA); a power transistor (Mp), output current of the power transistor (Mp) being adjusted according to the error voltage (VEA); and a substrate voltage (V_B) adjusting circuit (130), connected to the power tube (Mp), and configured to adjust substrate voltage (V_B) of the power transistor (Mp) according to the output current of the power transistor (Mp), so that the substrate voltage (V_B) decreases within a predetermined fluctuation range as the output current increases, thereby appropriately reducing the threshold voltage of the power transistor (Mp), and greatly increasing the maximum output current of the low dropout linear voltage



(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

regulator circuit.

(57) 摘要: 一种低压差线性稳压电路。该低压差线性稳压电路包括: 输出电压检测电路 (110), 用于检测所述低压差线性稳压电路的输出电压, 并产生对应的反馈电压 (VF); 误差放大电路 (120), 用于比较反馈电压 (VF) 和参考电压 (VREF), 并产生相应的误差电压 (VEA); 功率管 (Mp), 所述功率管 (Mp) 的输出电流根据所述误差电压 (VEA) 进行调整; 以及衬底电压 (VB) 调整电路 (130), 连接至所述功率管 (Mp), 并配置成根据所述功率管 (Mp) 的输出电流调整所述功率管 (Mp) 的衬底电压 (VB), 使得所述衬底电压 (VB) 在预定波动范围内随所述输出电流增大而降低, 以此来适当降低功率管 (Mp) 的阈值电压, 大幅增加低压差线性稳压电路的最大输出电流。

低压差线性稳压电路

技术领域

本发明实施例涉及电路技术，尤其涉及一种低压差线性稳压电路。

背景技术

5 LDO (Low Dropout Regulator, 低压差线性稳压器) 使用在其线性区域内运行的晶体管或场效应管 (FET), 从输入电压中减去超额的电压, 产生经过调节的输出电压。因其成本低, 噪音低, 静态电流小的特点, 广泛应用于电源电路中。

图 1 是现有技术中一种 LDO 电路的基本电路结构图。LDO 电路主要由
10 以下三个模块构成: 第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} 组成的检测输出电压 V_{OUT} , 并产生相应的反馈电压的输出电压检测电路、将反馈电压 V_F 与参考电压 V_{REF} 进行比较, 并产生相应的误差电压 V_{EA} 的误差放大器 EA 、根据误差电压 V_{EA} 对输出电流进行调整的功率管 M_P 。 AV_{DD} 和 AV_{SS} 分别为电源以及公共地, I_L 为负载电流。上述电路共同构成了负反馈网络, 使得理
15 想状态下输出电压 V_{OUT} 与参考电压 V_{REF} 成线性关系, 以此抵消因输入电压、环境温度、负载电流等变化的影响, 得到一个稳定的输出电压 V_{OUT} 。
输出电压的表达式如式 (1) 所示:

$$V_{OUT} = V_{REF} \frac{A * g_{mp} * r_{out}}{1 + \frac{R_{F2}}{R_{F1} + R_{F2}} A * g_{mp} * r_{out}} \quad \text{式 (1)}$$

其中 A 为误差放大器的增益, g_{mp} 为功率管 M_P 的跨导, r_{out} 为 LDO 输出
20 点的等效阻抗。

上述 LDO 电路至少存在两个极点: 误差放大器输出点对应的极点 ω_{p1} 以及 LDO 输出点对应的极点 ω_{p2} , 其中分别可以表达为式 (1) 和式 (2):

$$\omega_{p1} = -\frac{1}{r_{EA} * C_{EA}} \quad \text{式 (2);}$$

$$\omega_{p2} = -\frac{1}{r_{out} * C_{out}} \quad \text{式 (3);}$$

25 其中, r_{EA} 为误差放大器的等效输出阻抗, C_{EA} 为误差放大器输出点的等效电容, C_{OUT} 为 LDO 输出点的等效电容。

为了获得良好的瞬态响应特性, 通常会在 LDO 的输出加入 μF 级别的负载电容, 使得 C_{OUT} 很大。根据式 (3) 可知: ω_{p2} 很低。为了能够提供大的负

载电流范围，需要将功率管 M_P 的尺寸做的很大，这会使得 C_{EA} 较大，根据式 (3) 可知： ω_{PI} 较低。这会导致负反馈环路不稳定。

为了保证环路稳定，现有技术对 LDO 电路已经进行了许多改进，包括 Miller 补偿技术、间接补偿技术和极点分裂等技术，这些技术虽然提高了 LDO 在大范围电流负载下的环路稳定性，但是无法有效提升电流输出能力，这导致现有的 LDO 电路在提升电流输出能力的同时需要增加功率管 M_P 的尺寸、补偿电路的尺寸以及静态功耗，有的情况下这是无法接受的开销。

发明内容

10 本发明实施例提供一种低压差线性稳压电路，以解决现有 LDO 电路提升电流能力开销过大的问题。

根据本发明实施例的第一方面，提供了一种低压差线性稳压电路。该低压差线性稳压电路包括：输出电压检测电路，用于检测低压差线性稳压电路的输出电压，并产生相应的反馈电压；误差放大电路，用于比较反馈电压和参考电压，并产生相应的误差电压；功率管，功率管的输出电流根据误差电压进行调整；以及衬底电压调整电路，连接至功率管，并配置成根据功率管的输出电流调整功率管的衬底电压，使得衬底电压在预定波动范围内随输出电流增大而降低。

20 可选地，衬底电压调整电路包括：电流检测单元，用于检测功率管的输出电流；以及电压调整单元，与电流检测单元的输出相连，并配置成根据功率管的输出电流对衬底电压进行反馈控制，以使得衬底电压随输出电流增大而降低。

25 可选地，电流检测单元包括：第一场效应管，与功率管形成第一电流镜，第一电流镜用于按照第一电流镜像比例输出上述输出电流的第一镜像电流；第二场效应管和第三场效应管均工作在弱反型区，用于使第一场效应管与功率管的漏级电压近似相等，以提高第一电流镜的镜像精度，并且第一镜像电流通过第二场效应管输出；偏置电流源，为第三场效应管提供偏置电流。以及第四场效应管，与第五场效应管形成第二电流镜，其中第四场效应管接收第一镜像电流作为第二电流镜的镜像源。

可选地，第一场效应管、第二场效应管、第三场效应管分别为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，第四场效应管为 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，并且第一场效应管的栅极、源极、衬底分别与功率管的栅极、源极、衬底一一连接；第二场效应管的栅极与第三场效应管的栅极连接，第二场效应管的源极连接第一场效应管的漏极；第三场效应管的源极连接功率管的漏极，第三场效应管的漏极与第三场效应的栅极以及偏置电流源均相连；第四场效应管的源极接地，第四场效应管的栅极以及漏极均与第二场效应管的漏极相连。

10 可选地，电压调整单元包括：第五场效应管，与第四场效应管形成第二电流镜，第二电流镜用于将第一镜像电流按照第二电流镜像比例缩小为第二镜像电流；电阻部件，与第五场效应管以及功率管的衬底分别连接，以根据第二镜像电流产生相应的衬底电压。

15 可选地，第五场效应管为 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，第五场效应管的栅极与第四场效应管的栅极连接，第五场效应管的源极接地；电阻部件包括串联的第一电阻和第二电阻，其中第一电阻连接功率管的源极，第二电阻连接第五场效应管的漏极，第一电阻和第二电阻的连接点与功率管的衬底连接，从而提供衬底电压。

可选地，上述低压差线性稳压电路还包括：衬底漏电保护单元，并联于电阻部件两端。

20 可选地，衬底漏电保护单元包括：第六场效应管，第六场效应管为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，并且第六场效应管的栅极以及漏极分别连接至第五场效应管的漏极，第六场效应管的源极连接至功率管的源极。

25 可选地，输出电压检测电路包括串联连接的第一反馈电阻和第二反馈电阻，第一反馈电阻连接功率管的输出端，第二反馈电阻接地，第一反馈电阻和第二反馈电阻连接点的电压作为反馈电压。

可选地，低压差线性稳压电路还包括 Miller 补偿电路，Miller 补偿电路包括：串联连接的 Miller 补偿电容和 Miller 补偿电阻，Miller 补偿电容连接误差放大器的输出端，Miller 补偿电阻连接功率管的漏极。

可选地，低压差线性稳压电路还包括间接补偿电路，间接补偿电路包括：间接补偿电容和误差放大器的共源共栅管，间接补偿电容一端连接误差放大器的输出端，另一端连接共源共栅管的源极。

可选地，误差放大器包括第七场效应管、第八场效应管、第九场效应管、第十场效应管、第十一场效应管、第十二场效应管、第十三场效应管、第十四场效应管、第十五场效应管，第十二场效应管、第十三场效应管、第十四场效应管、第十五场效应管分别为 N 沟道场效应晶体管；第七场效应管、第八场效应管、第九场效应管、第十场效应管、第十一场效应管分别为 P 沟道场效应晶体管；第十二场效应管以及第十五场效应管作为共源共栅管；间接补偿电容一端连接至第十五场效应管的源极，另一端连接至功率管的输出端；第七场效应管的源极、第十场效应管的源极、第十一场效应管的源极分别连接电源；第八场效应管的源极以及第九场效应管的源极分别连接第七场效应管的漏极；第八场效应管的栅极连接反馈电压；第八场效应管的漏极连接第十二场效应管的源极；第九场效应管的栅极连接参考电压；第九场效应管的漏极连接第十五场效应管的源极；第十场效应管的栅极与第十一场效应管的栅极连接；第十场效应管的漏极与第十场效应管的栅极连接后连接至第十二场效应管的漏极；第十一场效应管的漏极输出误差电压，并与功率管的栅极以及第十五场效应管的漏极连接；第十二场效应管的源极还与第十三场效应管的漏极连接；第十五场效应管的源极与第十四场效应管的漏极连接；第十三场效应管的源极以及第十四场效应管的源极分别接地。

可选地，低压差线性稳压电路还包括：极点分裂电路，该极点分裂电路包括：具有低输入电容和低输出电阻的缓冲级，缓冲级连接在误差放大器与功率管之间。

可选地，缓冲级包括：缓冲级管，为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，缓冲级管的栅极连接误差放大器的输出端，缓冲级管的源极连接功率管的栅极，缓冲级管的漏极接地；缓冲电流源，缓冲电流源的第一端连接电源，缓冲电流源的第二端连接功率管的栅极和缓冲级管的源极。

根据本发明实施例提供的低压差线性稳压电路，通过检测功率管的输出电流的大小，自适应地调整功率管的衬底电压，以此来适当降低功率管的阈值电压，大幅增加低压差线性稳压电路的最大输出电流。

进一步地，本发明实施例提供的低压差线性稳压电路中，电流检测单元实时检测 LDO 功率管的电流大小；然后衬底电压调整单元根据电流检测电路的输出来调整功率管的衬底电压，功率管电流越大，衬底电压越低，功率管的电流能力就越强。

5 另外，衬底漏电保护单元用于避免功率管衬底电压过低导致的漏电。衬底电压自适应调整电路与 LDO 电路的主反馈环路是相互独立的，因此采用本方案不会对 LDO 电路的稳定性造成影响，可以被广泛应用于绝大多数现有结构的 LDO 电路。

10 根据下文结合附图对本发明具体实施例的详细描述，本领域技术人员将会更加明了本发明的上述以及其他目的、优点和特征。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 是现有技术中一种 LDO 电路的基本电路结构图；

图 2 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的示意框图；

图 3 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的原理图；

20 图 4 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的电路图；

图 5 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于 Miller 补偿结构的 LDO 的电路示意图；

图 6 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于间接补偿结构的 LDO 的电路示意图；以及

25 图 7 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于极点分裂技术的 LDO 的电路示意图。

具体实施方式

为使得本发明实施例的发明目的、特征、优点能够更加的明显和易懂，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、

完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明实施例一部分实施例，而非全部实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明实施例保护的范围。

图2为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的示意框图，图3为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的原理图，该低压差线性稳压电路一般性地可以包括：输出电压检测电路110、误差放大电路120、功率管 M_P 、以及衬底电压调整电路130。

输出电压检测电路110、误差放大电路120、功率管 M_P 共同构成低压差线性稳压电路的主反馈控制电路，其中输出电压检测电路110用于检测低压差线性稳压电路的输出电压，并产生相应的反馈电压。误差放大电路120用于比较低压差线性稳压电路的反馈电压和参考电压，并产生相应的误差电压，功率管 M_P 的输出电流根据所述误差电压进行调整，也即，功率管 M_P 用于根据误差电压对自身的输出电流进行调整。图3中示出的功率管 M_P 使用P沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，输出电压检测电路110包括第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} ，第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} 串联连接，其中第一反馈电阻 R_{F1} 连接功率管 M_P 的输出端，第二反馈电阻 R_{F2} 接地，第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} 连接点的电压作为反馈电压，也即利用第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} 对输出电压进行分压，从而使得低压差线性稳压电路的输出电压值按照第一反馈电阻 R_{F1} 和第二反馈电阻 R_{F2} 的阻值比例减小为反馈电压VF。该反馈电压VF直接反馈至误差放大器EA。误差放大电路120主要包括误差放大器EA，误差放大器EA将反馈电压VF与参考电压VREF进行比较，并产生相应的误差电压VEA。在另一些实施例中，本领域技术人员可以采用其他替代器件实现上述电路的功能。

衬底电压调整电路130连接至功率管 M_P ，并配置成根据功率管 M_P 的输出电流调整功率管 M_P 的衬底电压 V_B ，使得衬底电压 V_B 在预定波动范围内随输出电流增大而降低。一种实施例中，功率管 M_P 的漏极作为稳压电路的输出电压VOUT的输出端。

衬底电压调整电路130可以包括电流检测单元131、电压调整单元132、另外在一些实施例中还可以进一步包括衬底漏电保护单元133。

电流检测单元 131 用于检测功率管的输出电流。电压调整单元 132 与电流检测单元 131 的输出相连，并配置成根据功率管 M_P 的输出电流对衬底电压 V_B 进行反馈控制，以使得衬底电压 V_B 随输出电流增大而降低。衬底漏电保护单元 133 用于避免功率管 M_P 源极和衬底之间的二极管导通所产生的漏电。

以下结合一个实施例的电路图对上述衬底电压调整电路 130 进行介绍。图 4 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路的电路图。

电流检测单元 131 包括：第一场效应管 M_{PC} 、第二场效应管 M_1 、第三场效应管 M_2 、偏置电流源 I_B 、第四场效应管 M_3 。第一场效应管 M_{PC} 与功率管 M_P 形成第一电流镜，该第一电流镜可以按照第一电流镜像比例（表示为 $X:1$ ）输出上述输出电流的第一镜像电流。第二场效应管 M_1 和第三场效应管 M_2 ，均工作在弱反型区，用于使第一场效应管 M_{PC} 与功率管的漏级电压近似相等，以提高第一电流镜的镜像精度，并且第一镜像电流通过第二场效应管 M_1 输出，偏置电流源 I_B 为第三场效应管 M_2 提供偏置电流。第四场效应管 M_3 与第二场效应管 M_1 连接，用于接收第一镜像电流。其中，第一电流镜像比例的 $X:1$ 通常取较大的值，这样 M_1 管和 M_3 管上的电流较小。

电压调整单元 132 包括：第五场效应管 M_4 以及电阻部件，第五场效应管 M_4 与第四场效应管 M_3 连接，形成第二电流镜。第二电流镜用于将第一镜像电流按照第二电流镜像比例（表示为 $Y:1$ ）缩小为第二镜像电流。

电阻部件与第五场效应管 M_4 以及功率管 M_P 的衬底分别连接，以根据第二镜像电流产生相应的衬底电压 V_B 。衬底漏电保护单元 133 并联于电阻部件两端。

在本实施例一种可选的电路结构中，第一场效应管 M_{PC} 、第二场效应管 M_1 、第三场效应管 M_2 分别为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，第四场效应管 M_3 为 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，第五场效应管 M_4 为 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，作为衬底漏电保护单元 133 的第六场效应管 M_D 为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管。

第一场效应管 M_{PC} 的栅极、源极、衬底分别与功率管 M_P 的栅极、源极、衬底一一对应连接；第二场效应管 M_1 的栅极与第三场效应管 M_2 的栅极连接，第二场效应管 M_1 的源极连接第一场效应管 M_{PC} 的漏极；第三场

效应管 M_2 的源极连接功率管 M_P 的漏极, 第三场效应管 M_2 的漏极与第三场效应管 M_2 的栅极以及偏置电流源 I_B 均相连; 第四场效应管 M_3 的源极接地 $AVSS$, 第四场效应管 M_3 的栅极以及漏极均与第二场效应管 M_1 的漏极相连。

- 5 第五场效应管 M_4 的栅极与第四场效应管 M_3 的栅极连接, 第五场效应管 M_4 的源极接地 $AVSS$; 电阻部件包括串联的第一电阻 R_1 和第二电阻 R_2 , 其中第一电阻 R_1 连接功率管 M_P 的源极 (连接至电源 $AVDD$), 第二电阻 R_2 连接第五场效应管 M_4 的漏极, 第一电阻 R_1 和第二电阻 R_2 的连接点与功率管 M_P 的衬底连接, 从而提供衬底电压 V_B 。第六场效应管 M_D 的栅极
10 以及漏极分别连接至第五场效应管 M_4 的漏极, 第六场效应管 M_D 的源极连接至功率管 M_P 的源极。

- 输出电压检测电路 110 包括串联连接的第一反馈电阻 $RF1$ 和第二反馈电阻 $RF2$, 其中, 第一反馈电阻 $RF1$ 连接功率管 M_P 的输出端, 第二反馈电阻 $RF2$ 接地, 第一反馈电阻 $RF1$ 和第二反馈电阻 $RF2$ 连接点的电压
15 作为反馈电压。

上述电路的工作原理为:

- 功率管 M_P 和 M_{PC} 管组成第一电流镜, 其第一电流镜像比例为 $X:1$, X 通常取较大的值, 这样 M_1 管和 M_3 管上的电流较小, M_1 管配置为一个较大的宽长比 (W/L), 可以使得 M_1 管工作在弱反型区。偏置电流 I_B 取一个很小的值, 以减少 LDO 的静态功耗, M_2 管也配置为较大的 W/L , 可以
20 使得 M_2 管工作于弱反型区, 可以得到 M_{PC} 管的漏极电压 V_1 表达为式(4):

$$V_1 \approx V_2 + |V_{TH,1}| \approx V_{OUT} - |V_{TH,2}| + |V_{TH,1}| \approx V_{OUT} \quad \text{式 (4)}$$

- 在式中, V_2 为 M_1 管和 M_2 管的栅极电压, $V_{TH,1}$ 为 M_1 管的阈值电压, $V_{TH,2}$ 为 M_2 管的阈值电压, V_{OUT} 是低压差线性稳压电路的输出电压 (反馈电压)。由于功率管 M_P 和 M_{PC} 管的栅极电压相同, 源极电压相同, 衬底电压相同。并且功率管 M_P 和 M_{PC} 管的漏极电压近似相等。因此, M_{PC} 管
25 中的电流可以较为准确地镜像功率管 M_P 的电流, 从而可以表达为式(5):

$$I_{M3} \approx \frac{I_{MP}}{X} \quad \text{式 (5)}$$

- 30 其中, I_{M3} 是 M_3 管上的电流, I_{MP} 是功率管 M_P 的输出电流。

M₃管和M₄管组成第二电流镜，第二电流镜像比例为Y:1，M₃管和M₄管分别配置为较小的W/L，均工作在饱和区，以获得更准确的镜像比例。M₄管中的电流流过电阻R₁产生衬底控制电压V_B，从而得到式(6)：

$$V_{SB,MP} \approx \frac{I_{MP}}{X*Y} * R_1 \quad \text{式(6)}$$

5 $V_{SB,MP}$ 为功率管的源衬电压。由式(6)式可知：功率管M_P上的电流I_{MP}越大，源衬电压V_{SB,MP}就越大，并且选择合适的X、Y和R₁的值，可以在负载电流范围内得到一个范围合理的源衬电压V_{SB,MP}。进一步可以得到功率管M_P的阈值电压和饱和电流：

$$V_{TH,MP} = V_{TH0} + Y(\sqrt{|2\phi_F + V_{SB,MP}|} - \sqrt{|2\phi_F|}) \quad \text{式(7)}$$

$$10 \quad I_{MP} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS,MP} - V_{TH,MP})^2 \quad \text{式(8)}$$

其中V_{TH0}是不存在衬偏效应时的阈值电压，对于PMOS为一负值；Y是体效应系数；φ_F是与衬底掺杂浓度和温度相关的一个电势；μ_n是电子迁移率；C_{OX}是单位面积的栅氧化电容；W/L是功率管M_P的宽长比。由式(7)和式(8)可知：源衬电压V_{SB,MP}越大，功率管M_P饱和时能够提供越大的电流，并且电流成指数增长。

15 当功率管M_P上的电流I_{MP}增加到一定程度时，电阻R₁和R₂上产生的压降将会使得M_D管导通，此后继续增加功率管上的电流，功率管的衬底电压V_B几乎不再下降。而R₁和R₂的分压作用使得M_D管栅源电压差始终大于功率管的源衬电压V_{SB,MP}。因此，功率管M_P的源衬电压V_{SB,MP}一定会小于M_D管的阈值电压，这可以避免功率管M_P源极和衬底之间的二极管导通所产生的漏电。

本实施例的低压差线性稳压电路，衬底电压自适应调整电路与LDO的主环路是相互独立的，从而不会对LDO的稳定性造成明显影响，因此可以广泛应用于现有的大部分LDO电路结构中，可以使得这些LDO的电流能力大幅提高，根据实验仿真结果，可以提高例如20倍左右。并且开销仅有可以忽略不计的静态功耗和面积。以下是将本实施例的低压差线性稳压电路分别应用于Miller补偿结构的LDO（在功率管M_P与误差放大电路之间增设Miller补偿电路）、间接补偿结构的LDO（在功率管M_P与误差放大电路之间增设间接补偿电路）、极点分裂技术的LDO（在功率管M_P与误差放大电路之间增设极点分裂电路）的实例。

图 5 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于 Miller 补偿结构的 LDO 的电路示意图, C_c 是 Miller 补偿电容, R_c 是 Miller 补偿电阻, R_c 与 C_c 串联后连接于误差放大器 EA 的输出端与功率管 M_P 的漏极 (即低压差线性稳压电路的输出端 VOUT) 之间, 其中, R_c 连接误差放大器的输出端, C_c 连接功率管的漏极, 其他元件的连接关系可参看图 4 及对应描述, 此处不再赘述。在不增加衬底电压调整电路 130 的情况下, 增加 Miller 补偿结构的 LDO 的最大输出电流, 需要等比增加功率管 M_P 的尺寸。而在衬底电压调整电路 130 应用于 Miller 补偿结构时, 也即利用图 5 所示的电路时, 通过检测 M_P 输出电流的大小, 自适应地调整功率管 M_P 的衬底电压 V_B , 提升电流能力的开销仅有可以忽略不计的静态功耗和面积。从而既保留了 Miller 补偿结构的特点, 又以极小的开销提高了电流能力。

图 6 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于间接补偿结构的 LDO 的电路示意图, 与图 4 所示实施例相比较, 图 6 所示实施例的电路增加了间接补偿电路 160, 间接补偿电路 160 包括: 间接补偿电容 C_c 和误差放大器 EA 的共源共栅管 (包括第十二场效应管 M_{12} 和第十五场效应管 M_C), 间接补偿电容 C_c 一端连接至第十五场效应管 M_C 的源极, 另一端连接至功率管 M_P 的漏极 (即低压差线性稳压电路的输出端 VOUT)。

其中, 误差放大器 EA 包括: 第七场效应管 M_7 、第八场效应管 M_8 、第九场效应管 M_9 、第十场效应管 M_{10} 、第十一场效应管 M_{11} 、第十二场效应管 M_{12} 、第十三场效应管 M_{13} 、第十四场效应管 M_{14} 、第十五场效应管 M_C 。其中, 第十二场效应管 M_{12} 、第十三场效应管 M_{13} 、第十四场效应管 M_{14} 、第十五场效应管 M_C 分别为 N 沟道场效应晶体管, 第七场效应管 M_7 、第八场效应管 M_8 、第九场效应管 M_9 、第十场效应管 M_{10} 、第十一场效应管 M_{11} 分别为 P 沟道场效应晶体管。

其中第七场效应管 M_7 的源极、第十场效应管 M_{10} 的源极、第十一场效应管 M_{11} 的源极分别连接电源; 第八场效应管 M_8 的源极以及第九场效应管 M_9 的源极分别连接第七场效应管 M_7 的漏极; 第八场效应管 M_8 的栅极连接反馈电压 VF; 第八场效应管 M_8 的漏极连接第十二场效应管 M_{12} 的源极; 第九场效应管 M_9 的栅极连接参考电压 VREF; 第九场效应管 M_9 的漏极连接第十五场效应管 M_C 的源极; 第十场效应管 M_{10} 的栅极与第十一场效应

管 M_{11} 的栅极连接；第十场效应管 M_{10} 的漏极与第十场效应管 M_{10} 的栅极连接后连接至第十二场效应管 M_{12} 的漏级；第十一场效应管 M_{11} 的漏极输出误差电压 VEA ，并与功率管 M_P 的栅极以及第十五场效应管 M_C 的漏极连接；第十二场效应管 M_{12} 的源极还与第十三场效应管 M_{13} 的漏极连接；第十五场效应管 M_C 的源极与第十四场效应管 M_{14} 的漏极连接；第十三场效应管 M_{13} 的源极以及第十四场效应管 M_{14} 的源极分别接地。

在不增加衬底电压调整电路 130 的情况下，增加间接补偿结构的 LDO 的最大输出电流，需要等比增加功率管 M_P 的尺寸和补偿电容 C_C 的面积，这还会导致更大的静态功耗。而在衬底电压调整电路 130 应用于间接补偿结构的 LDO 时，也即利用图 6 所示的电路时，提升电流能力的开销也仅有可以忽略不计的静态功耗和面积。从而既保留了间接补偿结构的特点，也以极小的开销提高了电流能力。

图 7 为根据本发明一个实施例的低压差线性稳压电路应用于极点分裂技术的 LDO 的电路示意图，与图 4 的电路相比较，图 7 中该电路在误差放大器的输出端与功率管 M_P 的栅极之间增加了极点分裂电路，极点分裂电路包括具有低输入电容和低输出电阻的缓冲级 140（如图 7 中点线虚线框中所示），也即，缓冲级 140 的输入电容（与误差放大器相连点的电容）比功率管的栅极电容低，缓冲级的输出电阻（与功率管栅极相连点的等效电阻）比误差放大器的输出电阻低。比如，缓冲级的输入电容比功率管的栅极电容低两个数量级（100 倍）以上，缓冲级的输出电阻比误差放大器的输出电阻低两个数量级（100 倍）以上。

缓冲级 140 包括：缓冲级管 M_{buf} ，为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管， M_{buf} 的栅极连接误差放大器的输出端， M_{buf} 的源极连接功率管的栅极， M_{buf} 的漏极接地；缓冲电流源 I_{buf} ， I_{buf} 的第一端连接电源， I_{buf} 的第二端连接功率管的栅极和 M_{buf} 的源极。在不增加衬底电压调整电路 130 的情况下，增加极点分裂技术的 LDO 的最大输出电流，需要等比增加功率管 M_P 的尺寸，还需要大幅增加缓冲级跨导，这会大幅增加静态功耗。而在衬底电压调整电路 130 应用于极点分裂技术的 LDO 时，也即利用图 7 所示的电路时，提升电流能力的开销也仅有可以忽略不计的静态功耗和面积。从而既保留了极点分裂结构的特点，也以极小的开销提高了电流能力。

通过上述分析，可以看出本实施例的低压差线性稳压电路可以广泛应用于绝大多数现有的 LDO 结构，在保留原有 LDO 特点的同时，以可以忽略不计的开销，大幅提高 LDO 的电流能力。

通过以上的实施方式的描述，本领域的技术人员可以清楚地了解到上述
5 电路结构亦可以采用其他相同逻辑的器件实现。最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本发明实施例的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本发明实施例进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离
10 本发明各实施例技术方案的精神和范围。

1、一种低压差线性稳压电路，包括：

输出电压检测电路，用于检测所述低压差线性稳压电路的输出电压，并产生对应的反馈电压；

5 误差放大电路，用于比较所述反馈电压和参考电压，并产生相应的误差电压；

功率管，所述功率管的输出电流根据所述误差电压进行调整；以及

衬底电压调整电路，连接至所述功率管，并配置成根据所述功率管的输出电流调整所述功率管的衬底电压，使得所述衬底电压在预定波动范围内随所述输出电流增大而降低。

2、根据权利要求 1 所述的电路，其中，所述衬底电压调整电路包括：

电流检测单元，用于检测所述功率管的输出电流；以及

15 电压调整单元，与所述电流检测单元的输出相连，并配置成根据所述功率管的输出电流对衬底电压进行反馈控制，以使得所述衬底电压随所述输出电流增大而降低。

3、根据权利要求 2 所述的电路，其中，所述电流检测单元包括：

20 第一场效应管，与所述功率管形成第一电流镜，所述第一电流镜用于按照第一电流镜像比例输出所述输出电流的第一镜像电流；

第二场效应管，以及第三场效应管，均工作在弱反型区，用于使所述第一场效应管与所述功率管的漏级电压近似相等，并且使所述第一镜像电流通过第二场效应管输出；

偏置电流源，为所述第三场效应管提供偏置电流；以及

25 第四场效应管，与所述第二场效应管连接。

4、根据权利要求 3 所述的电路，其中，

所述第一场效应管、所述第二场效应管、所述第三场效应管分别为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，所述第四场效应管为 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，并且

所述第一场效应管的栅极、源极、衬底分别与所述功率管的栅极、源极、衬底一一对应连接；

所述第二场效应管的栅极与所述第三场效应管的栅极连接，所述第二场效应管的源极连接所述第一场效应管的漏极；

5 所述第三场效应管的源极连接所述功率管的漏极，所述第三场效应管的漏极与所述第三场效应管的栅极以及所述偏置电流源均相连；

所述第四场效应管的源极接地，所述第四场效应管的栅极以及漏极均与所述第二场效应管的漏极相连。

10 5、根据权利要求3或4所述的电路，其中，所述电压调整单元包括：第五场效应管，与所述第四场效应管形成第二电流镜，所述第二电流镜用于将所述第一镜像电流按照第二电流镜像比例缩小为第二镜像电流；电阻部件，与所述第五场效应管以及所述功率管的衬底分别连接，以根据所述第二镜像电流产生相应的所述衬底电压。

15

6、根据权利要求5所述的电路，其中，

第五场效应管为N沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，所述第五场效应管的栅极与所述第四场效应管的栅极连接，所述第五场效应管的源极接地；

20 所述电阻部件包括串联的第一电阻和第二电阻，其中所述第一电阻连接所述功率管的源极，所述第二电阻连接所述第五场效应管的漏极，所述第一电阻和所述第二电阻的连接点与所述功率管的衬底连接，从而提供所述衬底电压。

25 7、根据权利要求6所述的电路，其中，所述电路还包括：衬底漏电保护单元，并联于所述电阻部件两端。

8、根据权利要求7所述的电路，其中，所述衬底漏电保护单元包括：

30 第六场效应管，所述第六场效应管为P沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，并且所述第六场效应管的栅极以及漏极分别连接至所述第五场效

应管的漏极，所述第六场效应管的源极连接至所述功率管的源极。

9、根据权利要求4所述的电路，其中，

所述输出电压检测电路包括串联连接的第一反馈电阻和第二反馈电阻，
5 所述第一反馈电阻连接所述功率管的输出端，所述第二反馈电阻接地，所述
第一反馈电阻和所述第二反馈电阻连接点的电压作为反馈电压。

10、根据权利要求4所述的电路，其中，所述电路还包括 Miller 补偿电
路，所述 Miller 补偿电路包括：

10 串联连接的 Miller 补偿电容和 Miller 补偿电阻，所述 Miller 补偿电阻连
接所述误差放大器的输出端，所述 Miller 补偿电容连接所述功率管的漏极。

11、根据权利要求4所述的电路，其中，所述电路还包括间接补偿电路，
所述间接补偿电路包括：间接补偿电容和误差放大器的共源共栅管，间接补
15 偿电容一端连接所述功率管的漏极，另一端连接所述误差放大器的共源共栅
管的源极。

12、根据权利要求11所述的电路，其中，

所述误差放大器包括第七场效应管、第八场效应管、第九场效应管、
20 第十场效应管、第十一场效应管、第十二场效应管、第十三场效应管、第
十四场效应管、第十五场效应管，

所述第十二场效应管、所述第十三场效应管、所述第十四场效应管、
所述第十五场效应管分别为 N 沟道场效应晶体管；

所述第七场效应管、第八场效应管、第九场效应管、第十场效应管、
25 第十一场效应管分别为 P 沟道场效应晶体管；

所述第十二场效应管以及所述第十五场效应管作为所述共源共栅管；

所述间接补偿电容一端连接至所述第十五场效应管的源极，另一端连
接至所述功率管的输出端；

所述第七场效应管的源极、所述第十场效应管的源极、所述第十一场
30 效应管的源极分别连接电源；所述第八场效应管的源极以及所述第九场效

应管的源极分别连接所述第七场效应管的漏极；所述第八场效应管的栅极连接所述反馈电压；

所述第八场效应管的漏极连接第十二场效应管的源极；所述第九场效应管的栅极连接所述参考电压；所述第九场效应管的漏极连接所述第十五场效应管的源极；所述第十场效应管的栅极与所述第十一场效应管的栅极连接；所述第十场效应管的漏极与所述第十场效应管的栅极连接后连接至所述第十二场效应管的漏级；所述第十一场效应管的漏极输出所述误差电压，并与所述功率管的栅极以及所述第十五场效应管的漏极连接；所述第十二场效应管的源极还与所述第十三场效应管的漏极连接；所述第十五场效应管的源极与所述第十四场效应管的漏极连接；所述第十三场效应管的源极以及所述第十四场效应管的源极分别接地。

13、根据权利要求 4 所述的电路，其中，所述电路还包括极点分裂电路，所述极点分裂电路包括：具有低输入电容和低输出电阻的缓冲级，所述缓冲级连接在所述误差放大器与所述功率管之间。

14、根据权利要求 13 所述的电路，其中，所述缓冲级包括：

缓冲级管，为 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管，所述缓冲级管的栅极连接所述误差放大器的输出端，所述缓冲级管的源极连接所述功率管的栅极，所述缓冲级管的漏极接地；

缓冲电流源，所述缓冲电流源的第一端连接电源，所述缓冲电流源的第二端连接所述功率管的栅极和所述缓冲级管的源极。

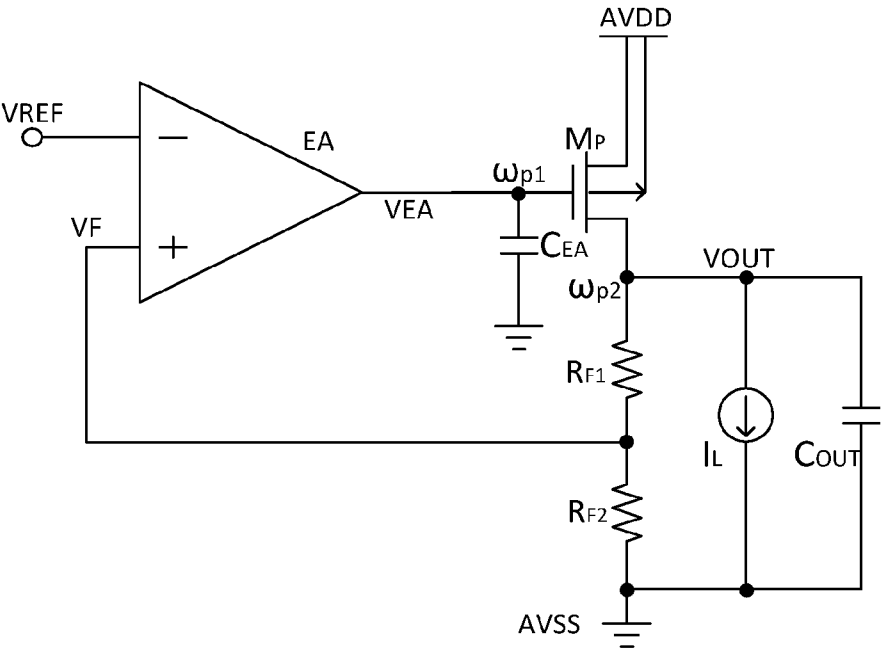


图 1

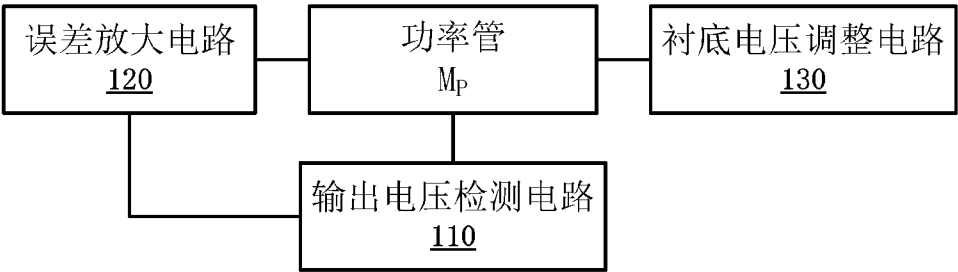


图 2

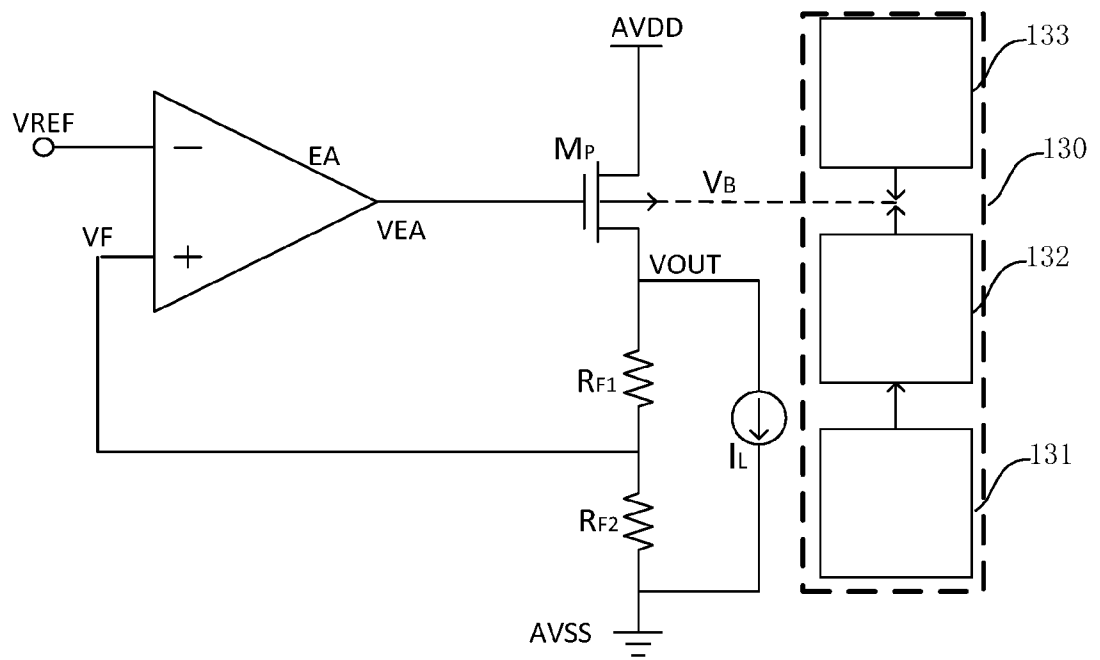


图 3

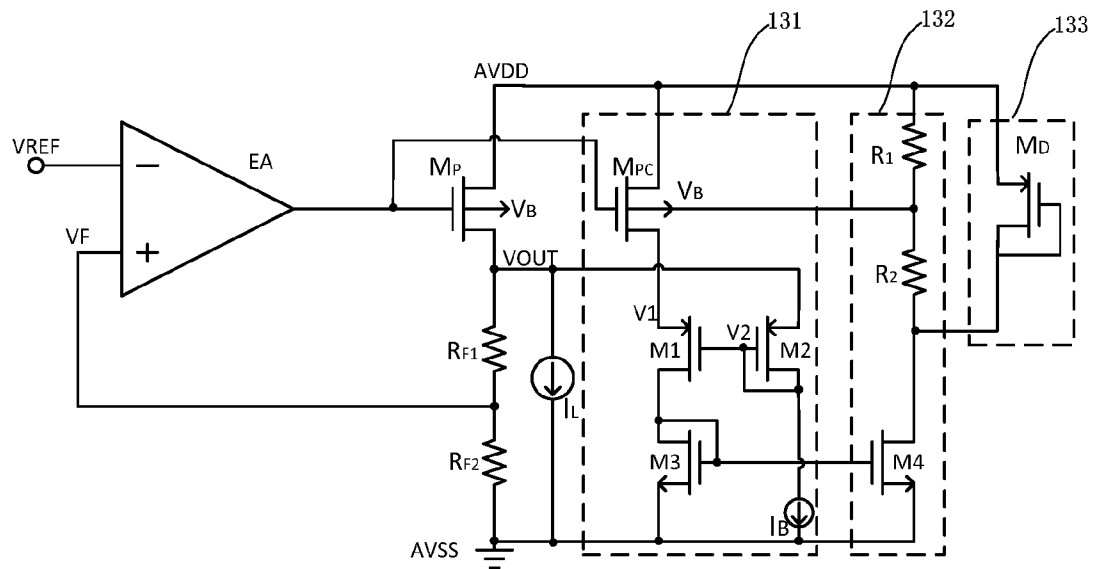


图 4

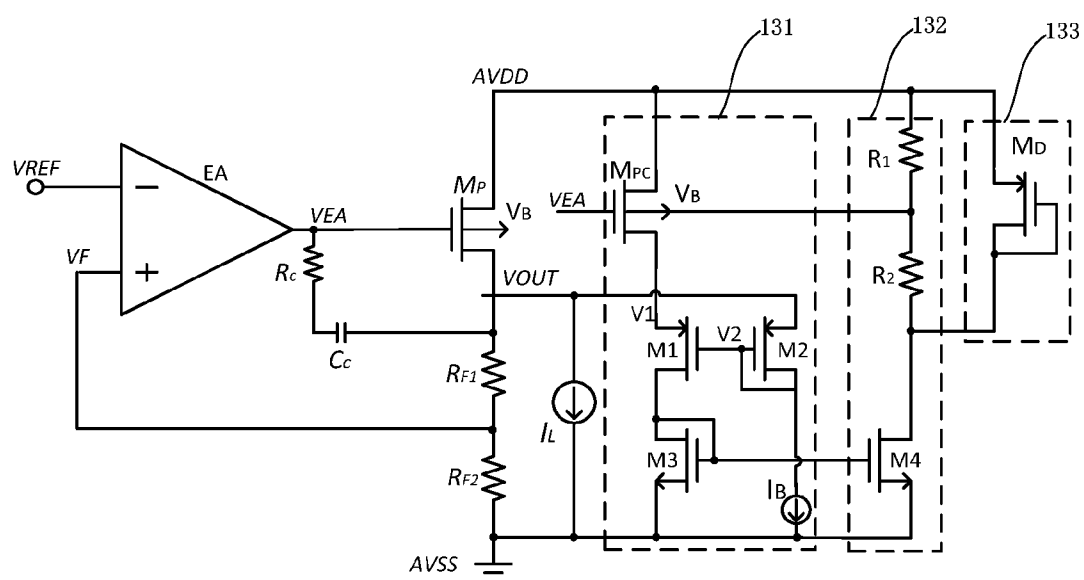


图 5

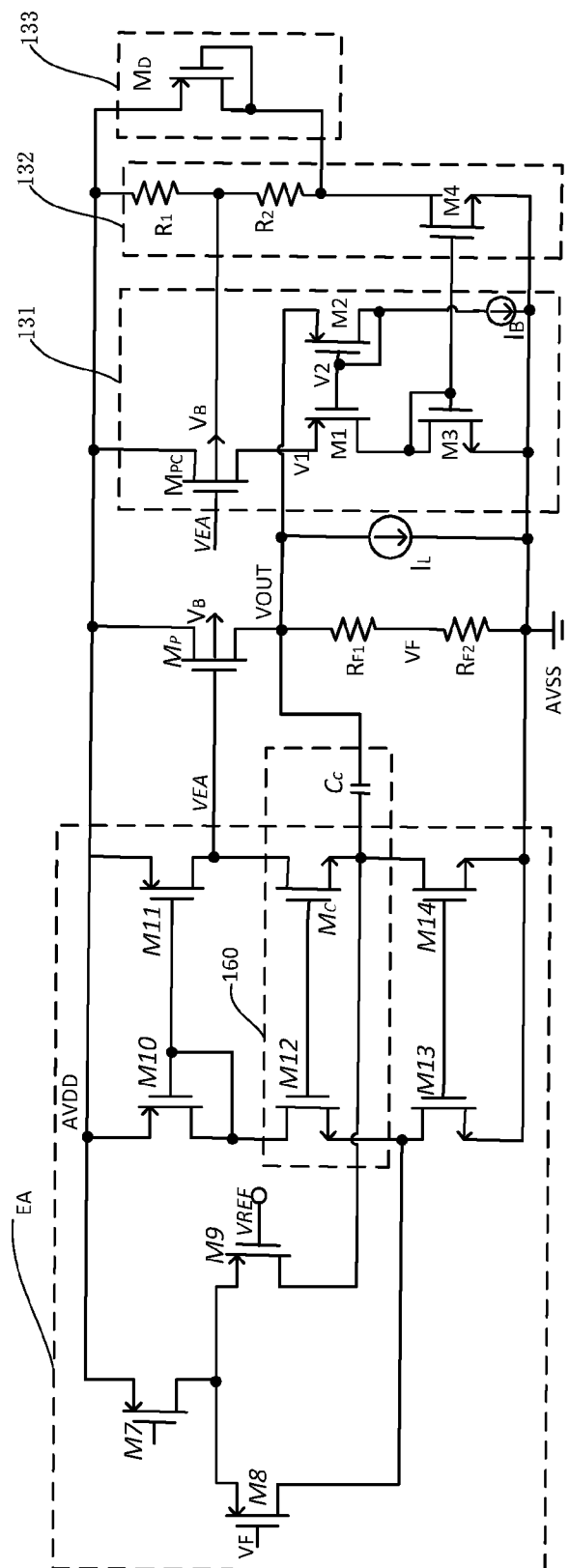


图 6

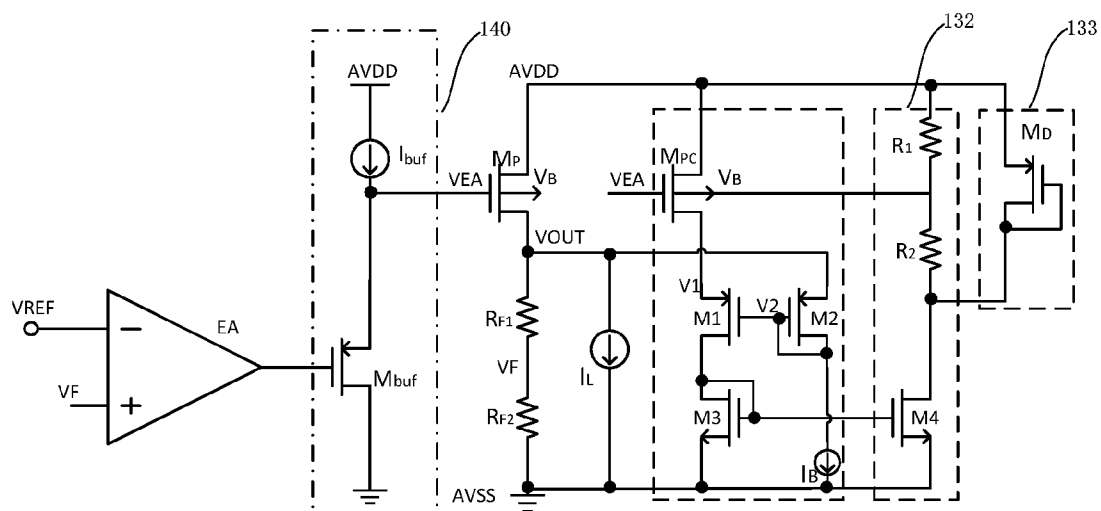


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/117136

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05F 1/56(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 低压差, 线性, 稳压, 检测, 反馈, 放大, 电流, 衬底, 电压, LDO, low, dropout+, regulator, detect+, feedback+, amplif+, current, substrat+, voltage

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 1828470 A (CHIPHOMER MICROELECTRONICS (SHANGHAI) CO., LTD.) 06 September 2006 (2006-09-06) description, page 4, line 10 to page 5, line 7, and figure 3	1-14
A	CN 101251758 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 27 August 2008 (2008-08-27) entire document	1-14
A	CN 203204489 U (WUXI VIMICRO CORPORATION) 18 September 2013 (2013-09-18) entire document	1-14
A	CN 102495656 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 13 June 2012 (2012-06-13) entire document	1-14
A	CN 104699153 A (SPREADTRUM COMMUNICATION (SHANGHAI) CO., LTD.) 10 June 2015 (2015-06-10) entire document	1-14

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 April 2018

Date of mailing of the international search report

23 May 2018

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2017/117136

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	1828470	A	06 September 2006	CN	100449449	C	07 January 2009
CN	101251758	A	27 August 2008	CN	100568150	C	09 December 2009
CN	203204489	U	18 September 2013	None			
CN	102495656	A	13 June 2012	None			
CN	104699153	A	10 June 2015	CN	104699153	B	08 February 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/117136

A. 主题的分类

G05F 1/56(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G05F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC:低压差, 线性, 稳压, 检测, 反馈, 放大, 电流, 衬底, 电压, LDO, low, dropout+, regulator, detect+, feedback+, amplif+, current, substrat+, voltage

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 1828470 A (启攀微电子上海有限公司) 2006年 9月 6日 (2006 - 09 - 06) 说明书第4页第10行至第5页第7行及附图3	1-14
A	CN 101251758 A (哈尔滨工业大学) 2008年 8月 27日 (2008 - 08 - 27) 全文	1-14
A	CN 203204489 U (无锡中星微电子有限公司) 2013年 9月 18日 (2013 - 09 - 18) 全文	1-14
A	CN 102495656 A (电子科技大学) 2012年 6月 13日 (2012 - 06 - 13) 全文	1-14
A	CN 104699153 A (展讯通信上海有限公司) 2015年 6月 10日 (2015 - 06 - 10) 全文	1-14

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 4月 25日

国际检索报告邮寄日期

2018年 5月 23日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

受权官员

郭星

传真号 (86-10)62019451

电话号码 86-(10)-53961491

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/117136

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	1828470	A	2006年 9月 6日	CN	100449449	C	2009年 1月 7日
CN	101251758	A	2008年 8月 27日	CN	100568150	C	2009年 12月 9日
CN	203204489	U	2013年 9月 18日	无			
CN	102495656	A	2012年 6月 13日	无			
CN	104699153	A	2015年 6月 10日	CN	104699153	B	2017年 2月 8日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)