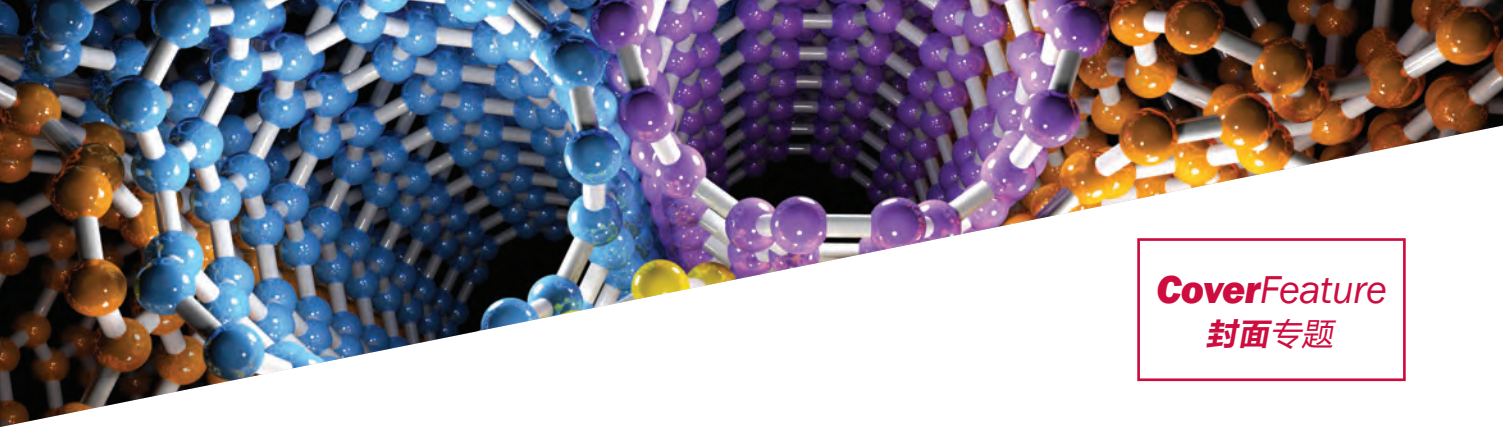


CoverFeature
封面专题

线性及功率难题的解决方案：碳纳米管射频放大器

Solving the Linearity and Power Conundrum: Carbon Nanotube RF Amplifiers

Philbert F. Marsh, Christopher Rutherglen, Alexander A. Kane, Tyler A. Cain and Kosmas Galatsis
Carbonics Inc., Culver City, Calif.
Stephen A. Maas, Nonlinear Technologies Inc., Long Beach, Calif.
Mohammed R. AlShareef, National Center for MEMS Technology, Riyadh, Saudi Arabia

碳纳米管（CNT）晶体管由于其弹道式输运特性而具有固有线性，并且可与CMOS单片集成。

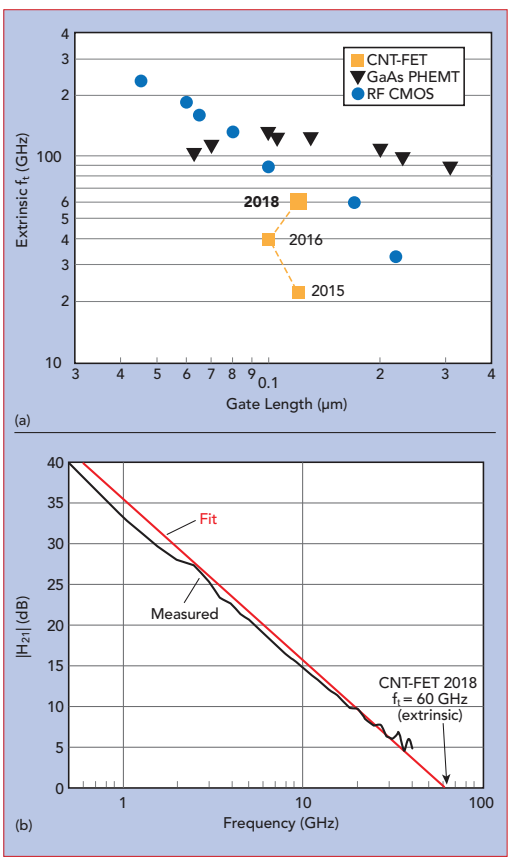


图1：Carbonics推出的CNT-FET[4-5]的f_t与GaAs PHEMT和射频CMOS技术之比较（a）。2018年制造的CNT-FET栅长110nm，外源性f_t达60GHz（b）。

如今射频环境日益拥挤，不需要的射频信号进入宽带射频前端放大器，导致接收机产生三阶互调失真（IMD3）。IMD3信号由于性质使然，通常接近于接收机的调谐频率，难以滤除。因此，较微弱的目标信号会被接收机生成的IMD3信号所湮没。同时，若存在大量的失真信号，则会形成新的噪声基底，超过接收机噪声系数本身所决定的噪声基底，从而缩小了动态范围。在数字通信中，灵敏度因此降低，表现为误码率（BER）升高，从而造成数据传输距离和速度受限。所以，我们需要较高的放大器输出三阶交调截取点（OIP3），因为对于给定的基本信号功率，OIP3每增加1dB，IMD3便会下降2dB。虽然靠增加晶体管尺寸和DC偏置功率都可以使OIP3升高，但类似于卫星和移动/便携式设备等诸多系统的功率都有限。对电路的线性化亦可提升OIP3；然而随着频率增加，效果会越来越差。对于给定的电路方案，仍然可以通过改善底层晶体管技术来改进OIP3。不单单依赖于上述方法，而是从根本上改善晶体管的固有线性度则是更理想的方案。[1]

晶体管固有线性的传输曲线，即漏极电流（I_d）对栅极电压（V_{gs}），可由其线性度品质因数OIP3/P_{dc}表示（单位为dB），其中P_{dc}为DC偏置功耗。更新、更密集的调制方案，例如用于5G的256-QAM，则需要具有高OIP3/P_{dc}比率的射频前端，以实现高灵敏度、高频带利用率以及低功耗。军事战场信号丰富，也要求OIP3/P_{dc}比率高[1]，从而实现高动态范围和灵敏度，同时延长电池寿命。

由于当前半导体技术成熟，若要在OIP3/P_{dc}或频率性能方面有所突破革新，就需要从射频半导体器件可能的材料和结构角度重新进行思考，而非局限于现有技术。考虑到成本的控制以及单片集成的可扩展性，新器件结构也必须与CMOS兼容。

碳纳米管场效应管（CNT-FET）采用对准的半导体碳纳米管制得，通过一维载流子输运。自1991年被发现以来，这些约1.5纳米的圆柱形碳分子一直被认为是一种新兴的高性能电子材料。虽然人们早就知道碳纳米管的传输特性非同一般，例如电流及跨导分别超过了每管25μA和20μs，但在很长一段时间内，如何同时实现高纯度的半导体碳纳米管（>99.9%）以及致密对准阵列（>40个/μm）成为一大挑战，于是这些特性未能在实际装置中完全展现。现在，我们已经克服了这些挑战，器件性能也因此得以提升。

与现有的半导体器件相比，这些器件的传输曲线线性度天然就更优异，因此具有更高的OIP3/P_{dc}比值。[2] Carbonics公司研发的碳纳米管晶体管结合了其电子传输特性的固有线性优势，以及一种在理论上[2]与实际中[3]均已验证可将OIP3/P_{dc}最大化的方法。借助于CNT-FET技术，f_t取得新高（见图1），从2015年的22 GHz增加到2018年的60 GHz。而Carbonics的CNT-FET实现了15.7dB的OIP3/P_{dc}和11.5dBm的OIP3。工作电压低（<3V）以及CMOS兼容性为数字和模拟的单片集成创造了可能。

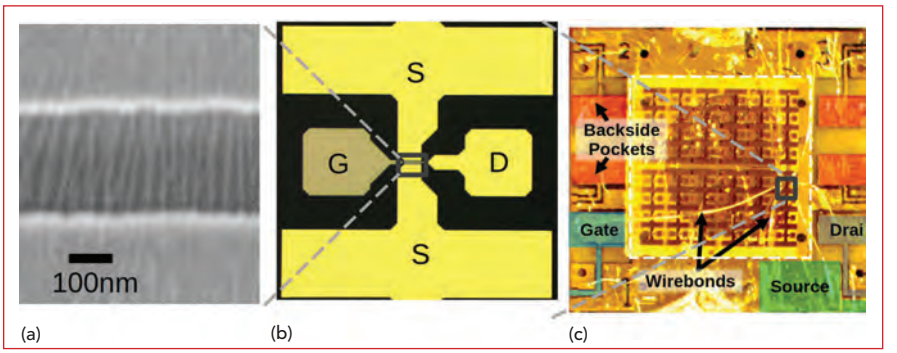


图2：布满场效应管沟道的对准单层高纯度半导体碳纳米管在形成T栅极之前的扫描电镜图像（a）、CNT-FET（b）、氧化铝芯片载体上的CNT-FET裸片（c）。

CNT-FET规格和晶圆测量

作为晶圆测量之外的可行性证明，我们构建并展示了两个L波段放大器（放大器1和2）。碳纳米管的分子结构类似于石墨烯（即碳原子的六边形），只不过它们组成管状且卷起的方向（即手性矢量）决定了其电子特性。[6]部分手性具有零带隙（即金属），其他的具有非零带隙（即半导体碳纳米管）。

目前的碳纳米管生产工艺暂时无法控制手性。因此，原生的碳纳米管中大约三分之一是金属性的，其余则是半导体的。只有后者可用于CNT-FET，因为金属碳纳米管中的电流不能通过绝缘体的电场调制，而这又是构造有用的场效应管所必须的。用于CNT-FET的碳纳米管需分拣以去除那些金属碳纳米管。

本文涉及的CNT-FET由高纯度半导体碳纳米管构成，掺有极少量的金属碳纳米管，约为0.1%。这确保了晶体管漏电流最小。然后采用Carbonics独家ZEBRA晶圆片沉积工艺将它们以单层形式沉积在石英晶圆上，形成图2a中所示的碳纳米管单层。两个放大器中使用的CNT-FET栅极宽度为50μm，栅极长度为140nm。图2b为基于石英衬底制造的CNT-FET，与放大器中使用的类似。放大器中所使用的CNT-FET来自于晶圆，其晶圆上测量显示当V_{ds}等于-1.5V时，外源性f_{max}和ft分别达到60 GHz和43-60 GHz。放大器1和2中使用的CNT-FET最大漏极电流I_{dmax}分别为143mA/mm和228mA/mm，V_{ds}为-1V时的开/关比分别为233和121，这表明金属碳纳米管含量非常低。

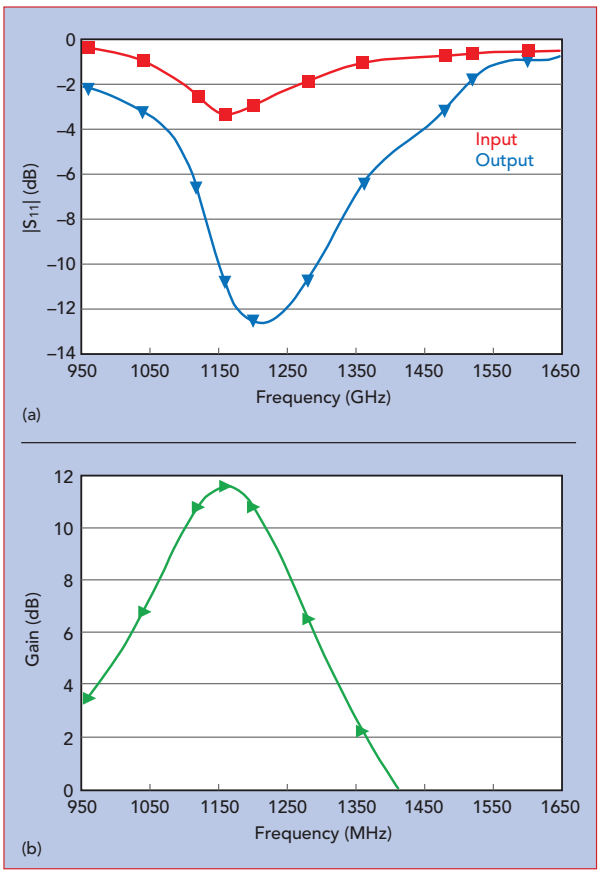


图4：放大器1的输入和输出$|S_{11}|$（a）及增益（b）。

设备、芯片载体以及放大器结构

如图2c所示，石英衬底的CNT-FET被切割挑选并安装到氧化铝芯片载体上。硬质氧化铝芯片载体可应用引线键合，同时也能使更软的低损耗射频材料用于射频PCB。加州大学洛杉矶分校的高频电子中心（UCLA CHFE）采用激光加工工具实现了254μm厚氧化铝芯片载体的金属化成形及绘制过程。该技术能够在焊盘后面形成凹坑，以减少寄生电容。芯片载体设计包括了探针焊盘结构，使得晶圆探针能直接测量所搭载CNT-FET的S参数，同时自动考量裸片到芯片载体键合线的射频特性。安装完毕后，CNT-FET芯片载体在芯片载体焊盘上进行探测，从而能够精确设计射频放大器PCB的阻抗匹配和偏置结构，而无需对载体进行建模。

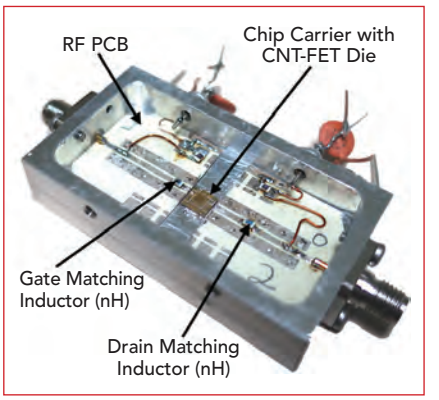


图3：封装的CNT-FET放大器。

安装在芯片载体上的放大器1的CNT-FET的f_t和f_{max}分别为3和7.9 GHz，而放大器2的CNT-FET测量结果为5和8 GHz。测量晶圆上f_t和f_{max}的大幅下降可能是由于键合线寄生电感和电阻引起的。在1.2 GHz时，芯片载体中引线键合的放大器1和2的最大稳定增益（MSG）分别为16和17 dB。

NI-AWR Microwave Office曾设计了一款放大器输入输出匹配电路，以实现1.2 GHz附近的最大增益。选定的CNT-FET栅极区域小，致使输入电容也极小（<0.6 pF），这造成1.2 GHz时的高容性栅极阻抗约为220Ω，需要大约31nH的栅极电感来匹配。在这样的条件下，使用集总元件可以节省空间并取得比单独使用微带元件更高的Q值和增益。

我们将微带调谐元件及偏置网络元件蚀刻到Rogers R04350B射频基板上，使用导电环氧树脂将无源元件粘合到PCB上，而后将PCB粘合到铝制外壳里

并添加连接器。最后，再使用导电环氧树脂安装包含了CNT-FET的氧化铝芯片载体，并连接其上导线实现电气连接（见图3）。

测量结果与讨论

使用标量分析仪测量增益、回波损耗、OIP3和1dB增益压缩。在V_{ds} = -1.16V且V_{gs} = -1.1V时，放大器1产生11.6 dB的峰值增益，而放大器2的峰值增益为10 dB（见图4）。对于放大器1而言，增益比其MSG低4.4dB，而放大器2的增益则比其MSG低7 dB。放大器2的增益、$|S_{11}|$和$|S_{22}|$响应和频率与放大器1的类似。

通过在1149和1182 MHz处施加两个射频信号来测量OIP3。放大器1的两个OIP3值（低频和高频IMD3产物）如图5所示，范围为-1至+1.8 dBm。相较之下，放大器2的OIP3为-1.8至+0.4 dBm。放大器1测得的1dB压缩点为-10.3dBm（见图6），而放大器2的1dB输出压缩点为-11.9dBm。这意味着放大器1和2的OIP3与P_{1dB}分别相差约10和12dB，符合甚至超过了大多数半导体器件的10dB经验法则。

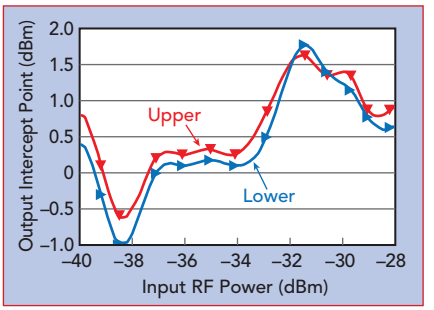


图5：输入为1160和1171MHz时放大器1的OIP3。

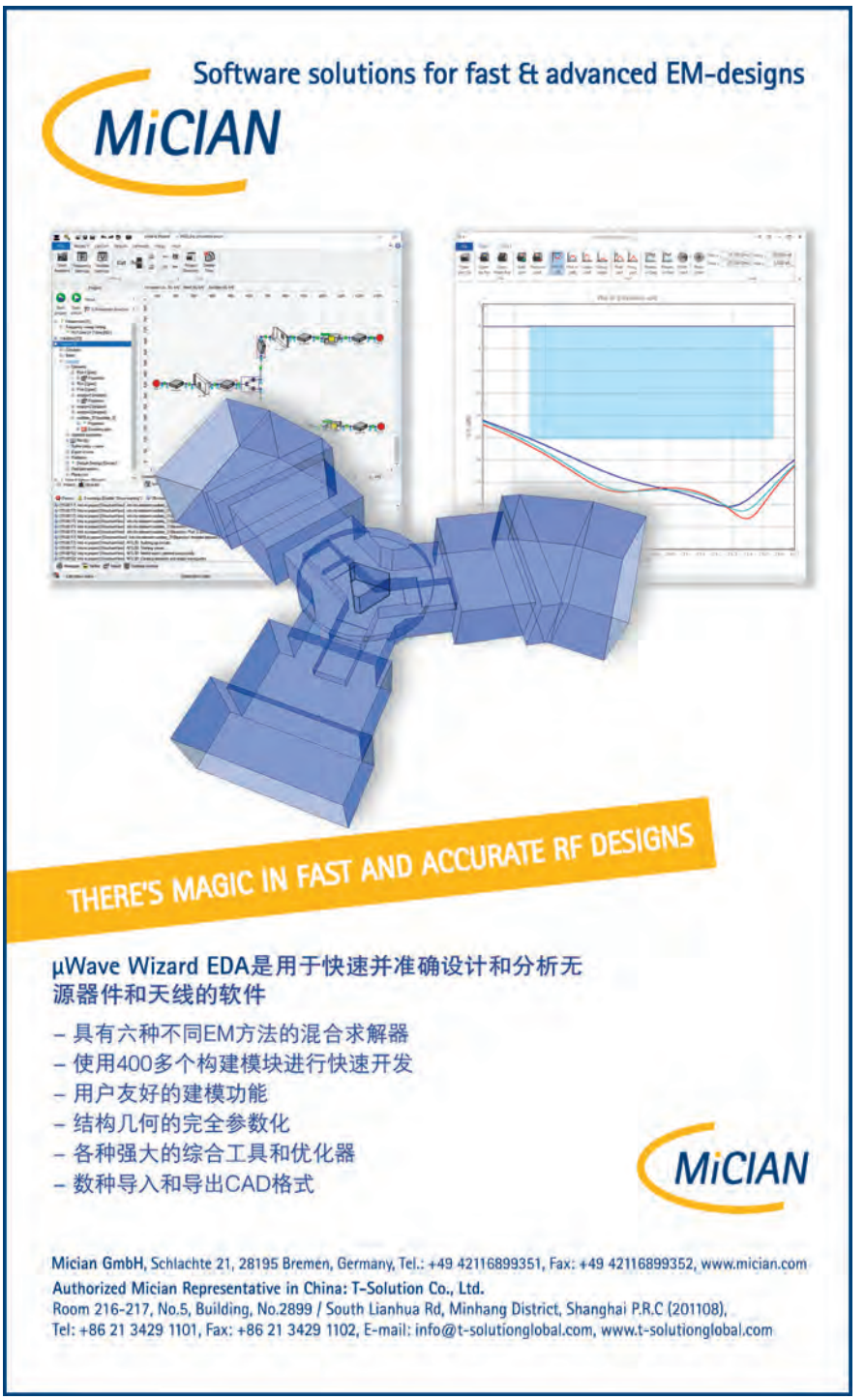
总的来说，这些结果在Eron等人的研究[7]基础上更进一步。他们曾设计出一款由CVD法制备的碳纳米管所制造的L波段CNT-FET放大器。然而，该CNT-FET[5]中金属碳纳米管含量非常高，因此与本文所探讨的CNT-FET相比漏电流亦较高。

未来发展方向和潜力

本文中所实现并描述的实验结果验证了采用对准的碳纳米管ZEBRA晶圆的CNT-FET技术的能力。然而，在此类电路设计中，裸片被用于最佳晶圆检测；因此，大尺寸裸片需要长约2mm的键合线，这也是主要的性能限制。

采用新的掩模组和改良设计的芯片载体应能提升后续CNT-FET电路的性能；预计频率响应会得到较大改善，噪声系数降低，同时OIP3增高。此外，这些放大器中所使用的CNT-FET是2018年中生产的批次。作为相关的首个放大器项目，自那以后，得益于技术水平的迅猛发展，2019年1月制造的最新CNT-FET显示其f_t和f_{max}性能已接近GaAs PHEMT，并且与射频CMOS相比更有优势（见图1），同时还具有与CMOS兼容的优点。这些结果即将发表。对于栅长为100nm的CNT-FET器件，基于单管测量结果可粗略估算出性能上限范围为跨导1200μs/μm、电流密度1500μA/μm以及f_t约300GHz左右。因此，CNT-FET技术未来仍有很大的发展空间。

这些最新的CNT-FET晶圆上的OIP3和OIP3/P_{dc}结果俨然已超越了CMOS和其他技术[1]（见图7）。Carbonics认为碳纳米管射频技术将在未来两到五年内用于国防和航空航天市场的分立及MMIC产品，实现商业化。它适合用来对雷达、通信和其他军事系统中的高频信号进行高灵敏度前端信号处理，尤其适用于前



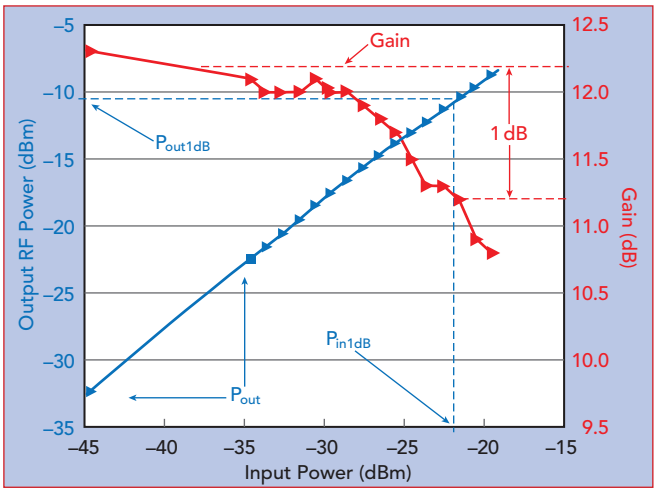


图6：在1.2GHz附近测得的放大器1的输出功率和增益vs输入功率。

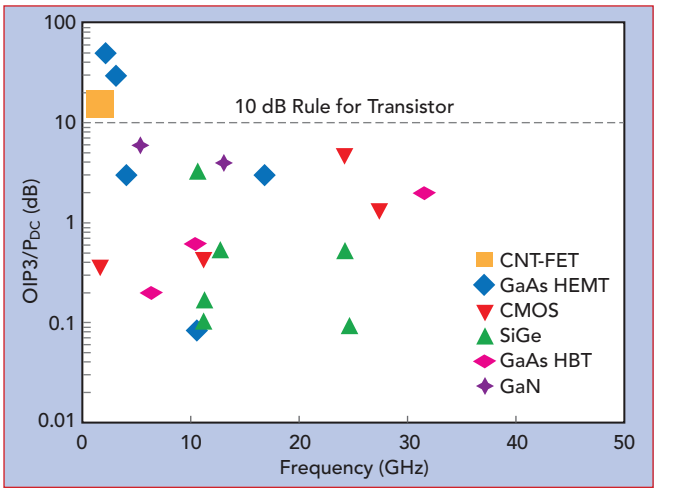


图7：2018年产CNT-FET与当前工艺技术的线性度比较[1]；此时1.5GHz下CNT-FET的OIP3/P_{dc}为15.7dBm。

端模块和电路，如混频器、振荡器、低噪声放大器和功率放大器。随着技术的日益成熟，人们还构想了更复杂的产品，以及与CMOS的单片集成。■

参考文献

1. "Dynamic Range-Enhanced Electronics and Materials (DREaM)," DARPA Broad Area Announcement, March 28, 2017.
2. J. Baumgardner, A. Pesetski, J. Murduck, J. Przybysz, J. Adam and H. Zhang, "Inherent Linearity in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors," Applied Physics Letters, Vol. 91, No. 5, August 2007, pp. 052107–052107-3.
3. S. Maas, "Linearity and Dynamic Range of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors," IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June 2017.
4. Y. Cao, G. J. Brady, H. Gui, C. Rutherglen, M. S. Arnold and C. Zhou, "Radio Frequency Transistors Using Aligned Semiconducting Carbon Nanotubes with Current-Gain Cutoff Frequency and Maximum Oscillation Frequency Simultaneously Greater than 70 GHz," ACS Nano, Vol. 10, No. 7, June 2016, pp. 6782–6790.
5. Y. Cao, Y. Che, H. Gui, X. Cao and C. Zhou, "Radio Frequency Transistors Based on Ultra-High Purity Semiconducting Carbon Nanotubes with Superior Extrinsic Maximum Oscillation Frequency," Nano Research, Vol. 9, No. 2, February 2016, pp. 363–371.
6. R. Caldwell, "Synthesis and Electronic Transport in Single-Walled Carbon Nanotubes of Known Chirality," Ph.D. Thesis, Columbia University, 2011.
7. M. Eron, S. Lin, D. Wang, M. Schroter and P. Kempf, "L-Band Carbon Nanotube Transistor Amplifier," Electronics Letters, Vol. 47, No. 4, February 2011.