

「高効率面放射型ホットエレクトロン放射素子の開発」

[1] 組織

代表者：嶋脇 秀隆

(八戸工業大学)

対応者：三村 秀典

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

村上 勝久 (産業技術総合研究所)

長尾 昌善 (産業技術総合研究所)

根尾 陽一郎 (静岡大学電子工学研究所)

細田 誠 (静岡大学電子工学研究所)

藤田 和久 (静岡大学電子工学研究所)

三村 秀典 (静岡大学電子工学研究所)

[2] 研究経過

MOS (金属 - 酸化膜 - 半導体) ダイオード構造からなる面放射型電子放出素子は、動作電圧が低い (十数 V)、面放射型であるためビーム指向性に優れる、放出される電子はホットエレクトロンであるため動作環境の制約が少ない (大気中でも動作可能) など、従来の針状構造を有する電界電子放出型電子源にはない様々な特長を有する。近年、これらの特長を活かした新たな応用として、ホットエレクトロンを利用した溶液分解反応や滅菌・殺菌処理、エアゾール分解などに利用する取り組みが検討されている。しかしながら、従来の MOS 型電子放出素子は、電子の取り出し効率 (電子放出効率) が著しく低く、実用化にあたり、電子放射効率の大幅な向上高電流密度化の両立が希求されている。電子放射効率低下の主な要因は、半導体基板の伝導帯から酸化膜中に Fowler-Nordheim トンネルした大部分の電子が酸化膜および上部金属電極を走行中に大きな非弾性散乱を受けてエネルギーを失い、金属表面の仕事関数を超えられずに電極によって回収され、真空中に放射されないことにある。従って、MOS 型電子放出素子の電子放射効率を著しく改善するためには、絶縁膜および上部金属電極内での電子のエネルギー減衰問題を如何に克服するかが鍵となる。これまでに、絶縁媒質中でのエネルギー減衰抑制には、極薄酸化被覆されたナノ結晶シリコン (nc-Si) 層の利用が有効であることを実証している。一方、上部金属電極については、極薄化すると効率が 2~3% まで向上することが予測されているが、膜厚 3 nm 以下の低抵抗な連続膜を形成するのは極めて困難であったため薄膜化には限界があった。本研究では、金属膜に代わり、導電性、電子透過性に優れたグラフェンを

適用し、電子放射効率の向上に取り組んでいる。グラフェンを電極として利用する場合、通常、転写法が用いられるが、皺や欠陥、レジスト残渣による汚染等の問題があり、MOS デバイスのような界面の清浄性が重要となるデバイスには不適切である。このため、本研究では、村上が開発した CVD 法を用いて nc-Si 上へグラフェン膜を直接合成した。昨年度に引き続き、グラフェン/ナノ結晶シリコン/シリコンの積層構造からなる平面型ホットエレクトロン放射素子 (図 1) を試作し、特性評価ならびに、放射電子のエネルギー分析を行った。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

本年度は、ナノ結晶層とグラフェン電極における散乱の影響について検討すべく、ナノ結晶シリコン層の厚さの異なる素子を作製し、電子放出特性を評価した。ナノ結晶シリコン層は、Nd:YAG レーザ (266 nm、13 ns、10 Hz) を用いたパルスレーザアブレーション法により形成し、成膜と同時に RF ラジカル源を用いて表面を酸化被覆した。上部ゲート電極用グラフェン膜は、CVD 法を用いて、ナノ結晶シリコン上に直接成膜した。グラフェンは、分光計により層数 2~3 層のポリ膜であることを確認している。

特性評価は、真空度 10^{-6} Pa、アノードと素子の間隔 5 mm、アノード印加電圧 200V の下で行った。

図 2 に、PLA1 時間 (約 150 nm)、1.5 時間 (約 200 nm)、2 時間 (約 250 nm) で製作した面放射型素子の典型的な電流-ゲート電圧特性、それぞれの素子からの放射電子のエネルギースペクトルを示す。横軸の 0 eV は、基板のフェルミ準位を基準にしている。エネルギー分析には平行メッシュ型エネルギー分析器を用いた。いずれの素子もリーク電流が大きく、エミッション電流の最大値は、PLA1.5 時間において 10 nA、エミッションエリアから算出した電流密度としては 10 mA/cm²、放出効率 0.01% と低い値にとどまっている。要因として、ナノ結晶表面の欠陥準位、グラフェンの成膜温度が 700°C 高いことによる酸化膜の炭素による還元などが考えられる。

放射電子のエネルギーのピーク値は、いずれの素子においてもゲート電圧の増加と共に高エネルギー側にシフトしていく。PLA1 時間の素子では、エネルギー分布の形状を保ったまま低エネルギー側のしきい値が高エネルギー側にシフトしており、上部電極内で

の散乱が抑制されていることを示唆している。PLA 1.5 時間と 2 時間の素子では、しきい値は変わらずに分散が広がっており、トンネル電子はナノ結晶シリコン層の走行距離に応じて大きく散乱されることを示唆している。

以上より、グラフェン電極の適用とナノ結晶シリコン層の膜厚の最適化により電子の受けるエネルギー散乱を抑制し、高エネルギーな電子放射が期待される。今後、リークの低減、ナノ結晶シリコンおよびグラフェンの成膜条件の最適化、高効率化、デバイス応用に取り組んで行く予定である。

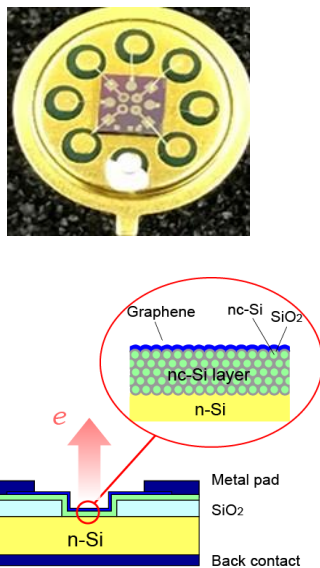


図1 面放射型ホットエレクトロン素子と構造

(3-2) 波及効果と発展性など

グラフェン電極は、面放射型電子源の電極として非常に有効である。グラフェン/nc-Si 電子源からの放射電子は高エネルギーであるため、電子放射効率を大幅に向上されることができれば、従来の電子源にない特長（動作環境に対する制約が低い）を活かした新たな応用展開が期待される。本プロジェクトで得られる成果は、これまで課題を解決する必須のキーテクノロジーとして、今後の発展が期待されている。

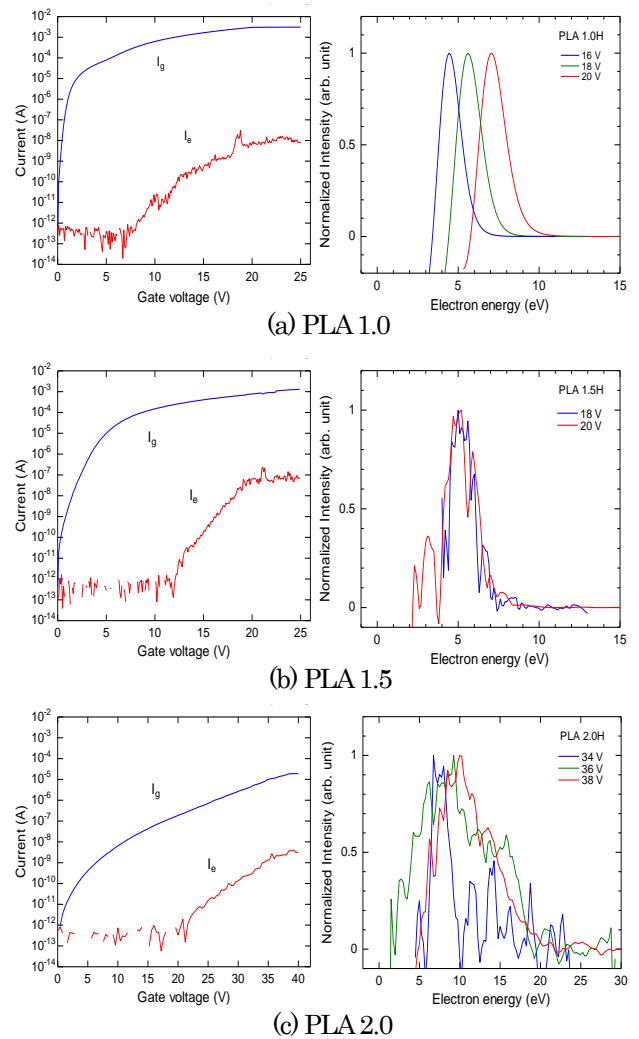


図2 素子の電流-電圧特性と放射電子のエネルギースペクトル

[4] 成果資料

- (1) H. Shimawaki, *et al.*, ECS Transactions, 92 (4), pp.223-229 (2019).

出張報告

なし