超高速撮像素子におけるアバランシェ増倍効果のシミュレーション解析

Monte Carlo Simulation of Avalanche Multiplication Effect in Ultrafast Image Sensor

[1] 阪大工, [2] 立命館大理工 ○ 南谷 夏海 [1], Vu Truong Son Dao[2], 下ノ村 和弘 [2], 江藤 剛治 [2], 鎌倉 良成 [1]

[1]Osaka Univ., [2]Ritsumeikan Univ. ○N. Minamitani[1], V. T. S. Dao[2], K. Shimonomura[2], T. G. Etoh[2], Y. Kamakura[1]

E-mail: minamit@si.eei.eng.osaka-u.ac.jp

【背景と目的】これまでディジタル記録型高速度ビデオカメラによる 1,600 万枚/秒の高速度撮影が達成されているが [1]、現在新たな目標として 10 億枚/秒を実現するための超高速撮像素子の開発が進められている [2]。このような領域では、1 フレームあたりの電荷収集量が少なくなるため、アバランシェ効果を活用した信号強度増幅も検討されている。しかしその一方で、撮影時間分解能は究極的には光電子が電荷収集部に到達するまでの時間バラつきで律速されることから、アバランシェ効果が生起した際の電荷収集の統計的振る舞いを考慮した素子設計が必要となる。本研究ではモンテカルロ法を用いたシミュレーション解析を行ったので報告する。【計算方法と結果】バルク Si に対するフルバンドモンテカルロシミュレータ [3,4] を用いて解析を行った 。幅 1 μm の空乏層を仮定した系に一定の電界 E を加えた上で、$x = 0$ からスタートさせた電子の挙動を追跡した (図 1)。電子が電界による加速を受けインパクトイオン化を起こすと、新たな電子-正孔対が発生する。今回我々は、発生した 2 次キャリアの挙動を全て追跡し、電子が空乏層端 ($x = 1$ μm) に到達した際の時間を記録した。同様のシミュレーションを 1,000 回繰り返し、電子到達時間の分布を求めた結果を図 2 に示す。ここで、各分布曲線に添えたカッコ内の数値は平均の電子増倍率を示しているが、$E = 290$ kV/cm の場合にはキャリアが無限に増倍する接合破壊と思われる現象が観測された。それより小さい E の下では、キャリア増倍は有限の値にとどまり、信号増幅が可能な条件となった。しかしながら、電子到達時間分布にはテイルが生じ、分布の先鋭さ（フレームレート) と増倍率の間にはトレードオフの関係があることが分かった。発生した 2 次正孔が逆方向に加速され、それがインパクトイオン化を起こして新たな電子を発生するいわゆるインパクトイオン化フィードバック効果 [5] がテイルの起源と考えられる。【謝辞】本研究の一部は JSPS 科研費 26630159 の支援を受け実施された。

【参考文献】[1] T. G. Etoh et al., ISSCC 2011, p. 406. [2] T. G. Etoh et al., IEDM 2014, p. 255. [3] T. Kunikiyo et al., J. Appl. Phys **75**, 297 (1994). [4] Y. Kamakura et al., J. Appl. Phys. **75**, 3500 (1994). [5] J. Bude et al., IEDM 1996, p. 865.

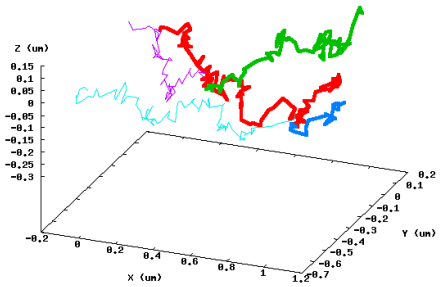

Fig. 1: Trajectories of electrons and holes simulated with full-band Monte Carlo simulation (E = 250 kV/cm). Thick and thin lines are for electrons and holes, respectively.

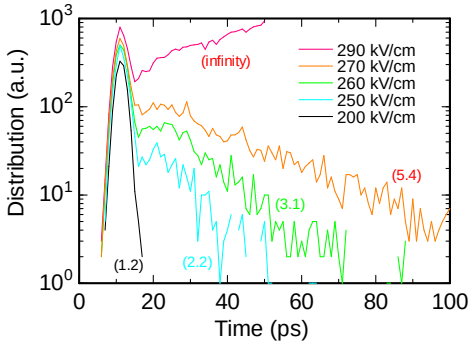

Fig. 2: Distribution of electron transit times simulated under various electric fields. The digits in parentheses represent mean multiplication factors for each result.

© 2015年 応用物理学会