

06.2;06.3;07

©1995

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРЕМНИЕВЫХ ТУННЕЛЬНЫХ МДП-СТРУКТУР

*М.И.Векслер, И.В.Грегов, С.А.Соловьев,
А.Г.Ткаченко, А.Ф.Шулекин*

В работе сообщается о первом наблюдении видимой электролюминесценции при инжекции горячих электронов в МДП-структурах (металл-диэлектрик-полупроводник) Al/SiO₂/Si (рис. 1) с туннельно-тонким слоем SiO₂. Структуры представляют собой двухэлектродные приборы, полученные термическим окислением в сухом кислороде ($T = 700^\circ\text{C}$, 20 мин) кремниевых подложек с последующим напылением Al контакта без отжига. Свечение вызывается горячими электронами, инжектируемыми в кремний при напряжении на диэлектрике $U \sim 2-5$ В, что при толщине диэлектрика 2-3 нм соответствует полю в нем более 10^7 В/см.

В исследуемых структурах величина U при прямом смещении близка к значению приложенного ко всей структуре напряжения V [1] (рис. 2). В режиме обратного смещения U может быть намного меньше, чем V , из-за падения напряжения на области пространственного заряда (ОПЗ) в кремнии.

Если перенос заряда через SiO₂ происходит посредством прямого туннелирования, то энергетическое распределение инжектируемых в полупроводник носителей имеет острый максимум вблизи уровня Ферми металла [2], т. е. попадающие в Si носители моноэнергетичны (рис. 2). Моноэнергетичность инжектируемых в Al/SiO₂/Si-системе носителей (электронов) была экспериментально проверена в структурах, аналогичных исследованным в настоящей работе [3]. При этом, в частности, выяснилось, что энергия E может достигать 3-4 эВ без деградации структуры. Основным механизмом релаксации энергии инжектированных носителей является взаимодействие с оптическими фононами [4], но определенную вероятность имеет межзонная излучательная рекомбинация горячих электронов, внутризонная релаксация с излучением [5], а также Оже-ионизация [3]. Потеря энергии на оптических фононах может быть частично компенсирована дополнительным "разогревом" в области объемного заряда в полупроводнике, если $U \ll V$.

Как впервые установлено в настоящей работе, если в кремний инжектируются горячие электроны (прямое смещение структур на p -Si и обратное в случае n -Si), то при

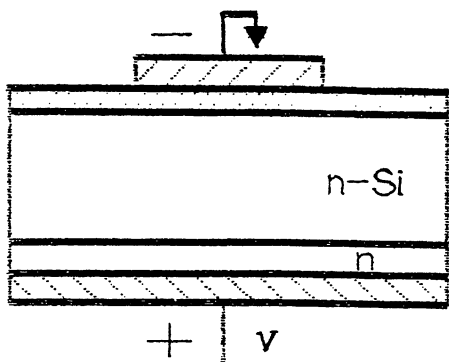


Рис. 1. Туннельная МДП-структура на n -Si, в которой наблюдалась электролюминесценция (с обозначением полярности прикладываемого напряжения). Прибор на подложке p -Si выглядит аналогично.

достаточно большом U (несколько вольт) наблюдается довольно интенсивная люминесценция в видимом диапазоне. Эффект полностью отсутствует при изменении полярности прикладываемого напряжения, т. е. при инжекции горячих дырок. Свечение отчетливо наблюдалось визуально по периферии верхнего алюминиевого электрода, а также в царапинах поперек всей его площади. Интенсивность свечения существенно возросла в ситуации, когда $V \gg U$. Как нам представляется, это связано с дополнительным "разогревом" горячих электронов в ОПЗ (рис. 2), в результате которого носители остаются горячими на большем расстоянии от границы раздела Si/SiO_2 , чем при $V \approx U$, и вероятность излучательных процессов возрастает. Заметим, что

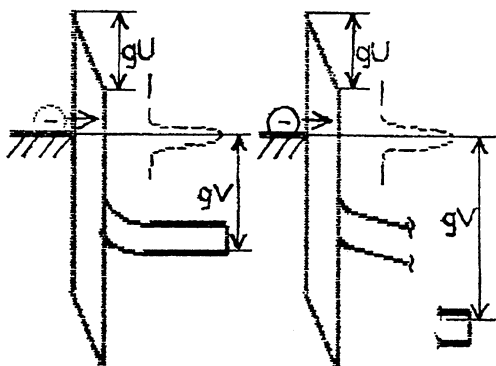


Рис. 2. Энергетические зонные диаграммы люминесцирующих туннельных структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$: слева — структура на p -Si при прямом смещении, справа — прибор на n -Si при обратном смещении. Пунктиром показано распределение по энергиям инжектируемых электронов на границе SiO_2/Si .

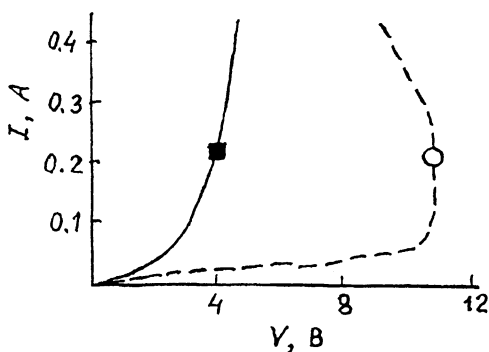


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики исследуемых структур. Площадь верхнего алюминиевого электрода 10^{-3} см². Сплошная линия — структура, выполненная на подложке из *p*-Si ($\rho = 0.1$ Ом·см), пунктир — на *n*-Si ($\rho = 1$ Ом·см).

из факта моноэнергетичности инжектируемых в Si носителей вовсе не следует, что в спектре излучения должен наблюдаться острый пик, поскольку носитель может потерять существенную часть своей энергии из-за рассеяния на фонах в полупроводнике еще до того, как произойдет излучательный переход.

Экспериментальные спектры люминесценции туннельных структур, также соответствующие ВАХ приведены на рис. 3, 4. Видно, что спектры, полученные для структур на

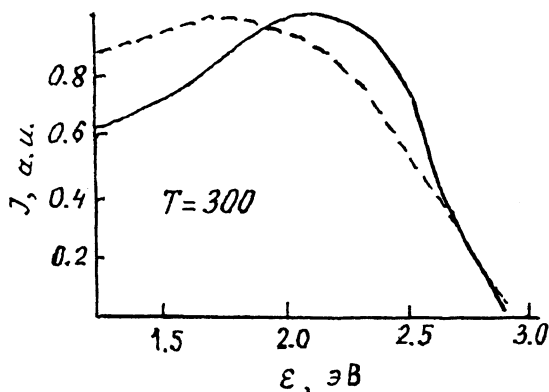


Рис. 4. Спектры электролюминесценции Al/SiO₂/Si структур. Сплошная линия — *p*-Si, пунктир — *n*-Si. Режим (напряжение, ток), в котором проводились измерения спектра, показан точками на рис. 3.

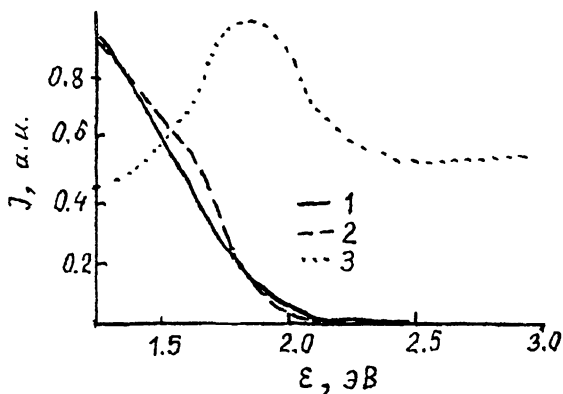


Рис. 5. Спектры излучения кремниевых структур, известные из литературы: 1 — p - n -переход при обратном смещении, 2 — полевой транзистор с коротким каналом, 3 — МДП-структура с толстым диэлектриком.

n -Si и p -Si, в общем, похожи: наблюдается максимум при $h\nu \approx 2.0$ эВ, а также достаточно быстрый спад интенсивности при больших энергиях фотона. В случае p -Si спад более резкий (коротковолновый "хвост", наблюдающийся для n -типа, почти полностью отсутствует). Это связано с тем, что энергия фотона строго ограничена начальной энергией инжектируемого электрона $E \approx qU$, так как дополнительный "разогрев" отсутствует и $U \approx V$ (режим прямого смещения). В случае же n -Si при легировании $10^{15} - 10^{16}$ см³ появляется небольшой "хвост", очевидно за счет дополнительного разогрева носителей в ОПЗ.

Механизм люминесценции может быть связан как с релаксацией носителей (электронов) внутри зоны проводимости (внутризонное свечение), так и с излучательной рекомбинацией с дырками из валентной зоны. Выяснение относительного вклада каждого из этих механизмов требует дополнительного исследования.

Представляет интерес сравнение полученных спектров со спектрами других кремниевых приборов, в которых наблюдалась видимая электролюминесценция [5-7] (рис. 5). К настоящему моменту изучена электролюминесценция при пробое обратносмещенных кремниевых p - n -переходов, короткоканальных полевых транзисторов и МДП-структур с толстым диэлектриком в режиме с протеканием тока. Спектры в первых двух системах, естественно, радикально отличаются от излучения туннельной МДП-структуры, поскольку электроны там обладают существенно меньшей

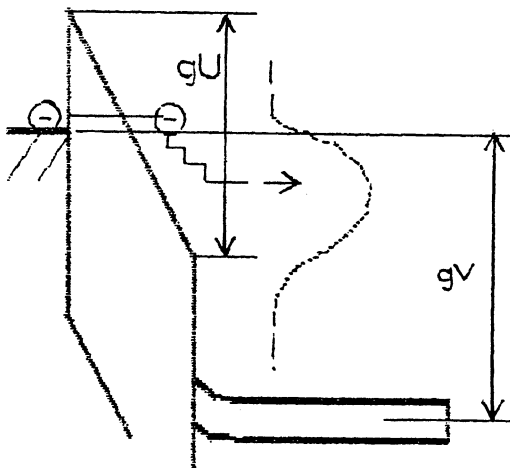


Рис. 6. Зонная диаграмма "толстой" структуры в режиме с протеканием тока и энергетическое распределение инжектируемых в ней электронов (пунктир, ср. рис. 2). Это наиболее близкий к нашему случай возбуждения электролюминесценции кремниевых структур.

энергией, которая приобретается в сильном электрическом поле в полупроводнике.

Более близка к нашему случаю ситуация в "толстой" МДП-структуре, в том смысле, что электроны вводятся в кремний изначально горячими [7]. Принципиальное различие состоит в том, что в толстых структурах часть носителей имеет весьма высокую энергию за счет разогрева при переносе по зоне проводимости диэлектрика (рис. 6). В результате этого имеет место заметное размытие инжектируемых электронов по энергии и в коротковолновой области спектра люминесценции "толстой" структуры наблюдается "плато", простирающееся до $h\nu \sim 4$ эВ и далее [5,7].

Таким образом, в работе исследована принципиально новая ситуация возбуждения электролюминесценции в кремнии — туннельная инжекция моноэнергетичных горячих электронов в Si с последующим высвечиванием благодаря внутрizonной релаксации носителей и излучательной рекомбинации.

Список литературы

- [1] Chang C.Y., Wang S.J. // Solid-State Electr. 1986. V. 29. P. 339.
- [2] Chang C., Hu C., Brodersen R.W. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 302.
- [3] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. // Solid-State Commun. 1993. V. 87. P. 341.
- [4] Drummond W.E., Moll J.L. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 5556.

- [5] *Debay G., Kolzer J.* // *Semicond. Sci. Technol.* 1994. V. 9. P. 1017.
[6] *Bude J., Sano N., Yoshii A.* // *Phys. Rev. B.* 1992. V. 45. P. 5848.
[7] *DiMaria D.J., Theis T.N., Kirtley J.R., Pesavento F.L., Dong D.V.* // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57. P. 1214.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
14 апреля 1995 г.
