

Механизм эрбиевой электролюминесценции в аморфном гидрогенизированном кремнии

© М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, П.Е. Пак, Е.И. Теруков, К.Д. Цэндин, И.Н. Ясиевич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 ноября 1998 г. Принята к печати 15 декабря 1998 г.)

Изучен механизм электролюминесценции эрбия в структурах, изготовленных на основе аморфного гидрогенизированного кремния, при обратном смещении. Возбуждение ионов эрбия происходит посредством оже-процесса, в котором электроны проводимости захватываются нейтральными оборванными связями (D^0 -центрами), расположенными поблизости от ионов эрбия. Стационарный ток через структуру поддерживается благодаря обратному процессу, которым является термостимулированная туннельная эмиссия электронов отрицательно заряженными дефектами типа оборванной связи (D^- -центрами) в зону проводимости аморфной матрицы.

Введение

Недавно наблюдались эффективная фото- и электролюминесценция ионов эрбия в аморфном гидрогенизированном кремнии, легированном эрбием ($a\text{-Si:H(Er)}$) [1–4]. Интерес к этой полупроводниковой матрице был вызван как очень простым и дешевым способом легирования ее эрбием (магнетронное распыление металлического эрбия в атмосфере силана SiH_4), так и сравнительно слабым температурным гашением в ней эрбиевой люминесценции, что делает этот материал перспективным для изготовления светодиодов на длину волны 1.54 мкм, работающих при комнатной температуре.

В работах [4,5] было высказано предположение, что возбуждение ионов эрбия в $a\text{-Si:H(Er)}$ происходит посредством оже-процесса, в котором электрон из зоны проводимости захватывается нейтральным дефектом типа оборванной связи (D^0 -центр), превращая его в отрицательно заряженный дефект (D^- -центр). Энергия перехода передается кулоновским взаимодействием $4f$ -электрону иона эрбия и возбуждает его из основного состояния $^4I_{15/2}$ в первое возбужденное состояние $^4I_{13/2}$.

В стационарном режиме должен существовать обратный процесс, который переводит дефекты из состояния D^- в состояние D^0 . В настоящей работе показано, что в случае электролюминесценции роль такого процесса играет многофононная туннельная ионизация D^- -центров приложенным электрическим полем. Эта ионизация определяет рост концентрации электронов в зоне проводимости и зависимость эрбиевой электролюминесценции от электрического поля.

Экспериментальные результаты

Электролюминесцентные структуры на основе аморфного гидрогенизированного кремния, легированного эрбием, изготавливались методом магнетронного распыления эрбия в атмосфере силана (MASD), в котором напыление происходит в разряде смеси аргона и си-

лана SiH_4 . Пленки толщиной 1 мкм наносились на подложку из кремния n -типа с концентрацией доноров $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Концентрация эрбия в исследованных структурах достигала примерно 10^{20} см^{-3} . Электролюминесценция измерялась в температурном интервале 77–300 К. Излучение эрбия наблюдалось на просвет через подложку кристаллического кремния. Измерения проводились в режиме постоянного тока.

Эрбиевая люминесценция в виде узкой линии при 1.54 мкм наблюдалась только при обратном смещении на структуре. Зависимость интенсивности эрбиевой люминесценции I_{EL} и электрического тока через структуру от электрического поля E при высоких полях $E > 1.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ асимптотически стремится к закону $\ln I_{EL} \propto E^2$. Температурная зависимость интенсивности эрбиевой люминесценции для различных токов через структуру представлена на рис. 1.

Обсуждение результатов

Внедрение ионов эрбия в аморфную матрицу сопровождается образованием большого числа дефектов в виде оборванных связей с концентрацией порядка 10^{18} см^{-3} . Поэтому мы можем предположить, что

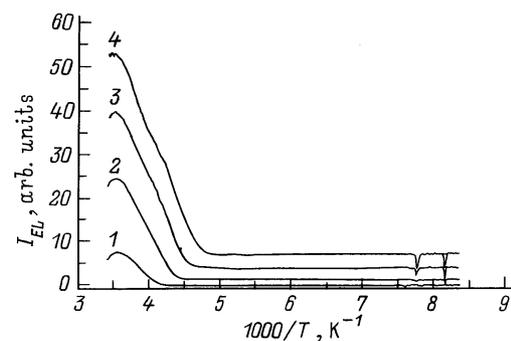


Рис. 1. Температурные зависимости интенсивности эрбиевой электролюминесценции при токах $I, \text{ мА}$: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20.

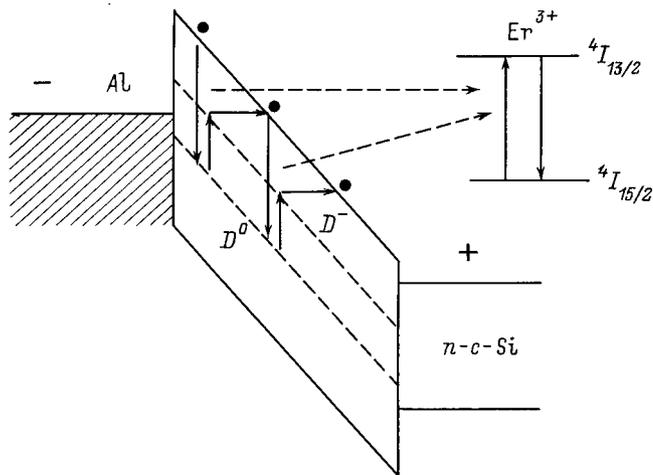


Рис. 2. Энергетическая зонная схема и переходы электронов при обратном смещении.

дефекты типа оборванных связей (D -центры) находятся вблизи от ионов эрбия. Можно ожидать также, что введение эрбия в аморфный кремний, содержащий большую концентрацию кислорода, вызывает образование эрбиево-кислородных комплексов донорного типа, подобных тем, которые образуются в кристаллическом кремнии. В этом случае имеется примерно равное число D -центров в нейтральном и отрицательно заряженном состояниях D^0 и D^- .

При обратном смещении избыточные электроны появляются в зоне проводимости благодаря термостимулированной туннельной ионизации D^- -центров в электрическом поле. Их концентрация растет экспоненциально с приложенным электрическим полем согласно соотношению $n = n_0 \exp(E^2/E_c^2)$, где E_c — характерное электрическое поле. При движении в аморфном слое эти электроны захватываются D^0 -центрами и могут возбуждать эрбиевую или связанную с дефектами люминесценцию. Соответствующая схема переходов показана на рис. 2.

Переход $e + D^0 \rightarrow D^-$ может происходить излучательным или безызлучательным образом. В случае, когда D -центры расположены вблизи от ионов эрбия, открывается еще один канал рекомбинации: возможен оже-процесс, сопровождающийся возбуждением иона эрбия благодаря кулоновскому взаимодействию между электроном, захватываемым D^0 -центром, и $4f$ -электроном иона эрбия. Такой процесс оже-возбуждения, связанного с дефектами (DRAE), особенно эффективен из-за его почти резонансного характера. Избыточная энергия перехода передается локальным фононам. Подробное теоретическое рассмотрение процесса DRAE изложено в работе [6]. Интенсивность эрбиевой люминесценции описывается соотношением

$$I_L = c_A n N_{D^0} (\tau / \tau_R) = c_A n_0 \exp(E^2/E_c^2) N_{D^0} (\tau / \tau_R),$$

где c_A — вклад в коэффициент захвата от процесса DRAE, τ и τ_R — полное и излучательное време-

на жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии, n и N_{D^0} — концентрации электронов в зоне проводимости и на D^0 -центрах соответственно. Величина характерного поля, определенная из экспериментальной зависимости $\ln I_{EL} \propto E^2$, $E_c = 1.6 \cdot 10^5$ В/см, согласуется с результатами исследования многофононной туннельной ионизации глубоких центров в кристаллическом кремнии [7].

Температурная зависимость интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) измерялась при постоянном токе через структуру. Легко показать, что наблюдаемое температурное возрастание ЭЛ вызвано экспоненциальным ростом концентрации D -центров в нейтральном состоянии (N_{D^0}) с ростом температуры.

Заключение

Таким образом, мы наблюдали сильную электролюминесценцию ионов эрбия при комнатной температуре в полупроводниковой структуре на основе аморфного кремния. Характеристики структуры представляются перспективными для дальнейшей разработки светодиодов, излучающих на длине волны 1.54 мкм и интегрируемых в кремниевую электронику. Выявлен механизм прохождения электрического тока через структуру: он контролируется многофононной туннельной ионизацией D^- -центров в приложенном электрическом поле и обратным процессом захвата свободных электронов D^0 -центрами. Оже-возбуждение, связанное с дефектами (DRAE), представляет собой сильный канал захвата электронов из зоны проводимости и ответственно за возбуждение ионов эрбия, находящихся вблизи от дефектов типа оборванных связей. Вся совокупность наших экспериментальных данных согласуется с предложенными механизмами.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 96-02-16931а и № 98-02-18246), Министерством науки Российской Федерации (грант 97-1036), программой INCO-COPERNICUS (грант 977048-SIER) и грантом NATO (HTECH.LG 972032).

Список литературы

- [1] M.S. Bresler, O.B. Gusev, V.Kh. Kudoyarova, A.N. Kuznetsov, P.E. Pak, E.I. Terukov, I.N. Yassievich, B.P. Zakharchenya, W. Fuhs, A. Sturm. Appl. Phys. Lett., **67**, 3599 (1995).
- [2] J.H. Shin, R. Serna, G.N. van den Hoven, A. Polman, W.G.J.M. van Stark, A.M. Vredenburg. Appl. Phys. Lett., **68**, 997 (1996).
- [3] A.R. Zanatta, Z.A. Nunes, Z.R. Tessler. Appl. Phys. Lett., **70**, 511 (1997).
- [4] O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, E.I. Terukov, M.S. Bresler, V.Kh. Kudoyarova, I.N. Yassievich, B.P. Zakharchenya, W. Fuhs. Appl. Phys. Lett., **70**, 240 (1997).
- [5] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. Phys. Rev. B, **56**, 9545 (1997).

- [6] I.N. Yassievich, M.S. Bresler, O.B. Gusev. *J. Phys. C*, **9**, 9415 (1997).
- [7] V.N. Abakumov, V.I. Perel, I.N. Yassievich. *Nonradiative Recombination in Semiconductors* (North Holland, Amsterdam, 1991).

Редактор Т.А. Полянская

Mechanism of erbium electroluminescence in an amorphous hydrogenated silicon

M.S. Bresler, O.B. Gusev, P.E. Pak, E.I. Terukov,
K.D. Tsendin, I.N. Yassievich

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia