

06

## Увеличение заселенности долгоживущих возбужденных примесных состояний кремния в электрическом поле

© А.М. Мусаев

Институт физики ДагНЦ РАН, Махачкала  
E-mail: akhmed-musaev@yandex.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2007 г.

Исследована кинетика терагерцового излучения кремния  $n$ -типа в сильных электрических полях и при одноосной деформации кристалла при 4.2 К. Обнаружено усиление интенсивности терагерцового излучения, связанное с увеличением заселенности долгоживущих возбужденных состояний примесных атомов в электрическом поле. Показано, что увеличение заселенности возбужденных состояний обусловлено комбинационным механизмом захвата горячих электронов.

PACS: 07.57.Hm, 78.60.Fi, 78.67.De

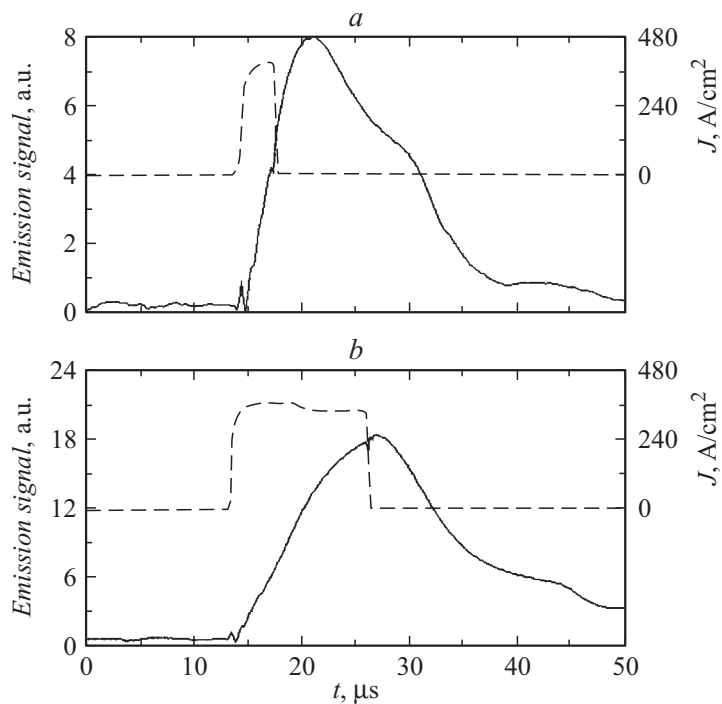
Интерес к неравновесным населенностям возбужденных состояний мелких примесных центров в полупроводниках связан с возможностью создания новых активных сред для генерации электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне спектра. Перспективным направлением для этого является использование примесных состояний доноров в кремнии, так как кремний обладает малым значением коэффициента решеточного поглощения, большим сечением оптических переходов и относительно большими временами жизни электронных состояний, что позволяет сравнительно легко достигнуть инверсию заселения таких состояний. Авторами работ [1,2] в экспериментах при фото-возбуждении кристаллов  $n$ -Si  $\text{CO}_2$ -лазером при  $T = 4.2$  К реализована стимулированная генерация терагерцового излучения (ТИ) в диапазоне волн  $\nu = 180 \text{ cm}^{-1}$ , механизм инверсии которой связан с инверсией долгоживущих возбужденных состояний мелких доноров (P, Bi, As), формируется особенностями внутрицентральной релаксации электронов на акустических и оптических фононах. В работе [3] исследована электролюминесценция в терагерцовом диапазоне электромагнитных волн

в Si(P) при температурах  $12 \div 30$  К. Носители заряда возбуждались посредством ударной ионизации примесных атомов в электрическом поле. В работе показано, что ТИ связано с излучательными переходами между состояниями примесных центров.

Актуальной задачей является получение сравнительно простым способом инвертированных распределений носителей заряда в кремнии, проводящих к генерации стимулированного ТИ. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований, полученные при воздействии на примесный центр внешних факторов, сообщающих ему энергию активации и приводящих к увеличению заселенности долгоживущих возбужденных состояний примесных центров кремния.

Исследования проводились на образцах кремния, легированных фосфором с концентрацией примесей  $N_D - N_A = 2.0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , которые имели форму прямоугольных параллелепипедов с кристаллографической ориентацией по направлениям: [100], [010], [001], с характерными размерами  $1.5 \times 2.0 \times 15.0 \text{ mm}$ . На боковые грани  $2.0 \times 15.0 \text{ mm}$  наносились омические контакты. Исследования при одноосной упругой деформации (ОУД) кристалла проводились в конфигурации полей  $\mathbf{E} \parallel [100]$ ,  $\mathbf{P} \parallel [001]$ . Ударная ионизация примесных атомов и разогрев носителей заряда осуществлялись импульсами электрического поля. С целью уменьшения порогового поля пробоя и увеличения скорости ударной ионизации проводилось предварительное фотовозбуждение образца. Фотовозбуждение образца проводилось импульсно, с длительностью импульса —  $20 \mu\text{s}$ , монохроматическим излучением с энергией кванта  $\hbar\omega \approx 1.5 \text{ eV} > \varepsilon_q^{\text{Si}}$ . Для исключения влияния фотовозбуждения образца на характеристики фотоприемника импульсы электрического поля прикладывались к образцу с задержкой до  $\sim 100 \mu\text{s}$  относительно импульсов фотовозбуждения. Интенсивность фотовозбуждения соответствовала пороговому полю пробоя  $E_B = 1000 \text{ V/cm}$ . Для уменьшения перегрева образца прямоугольные одиночные импульсы электрического поля имели длительность  $t_E = 1.0 \div 15.0 \mu\text{s}$ . Регистрация терагерцового излучения проводилась так же, как в работе [1], в полосе спектральной чувствительности ( $\lambda \approx 30 \div 120 \mu\text{m}$ ) фотоприемника Ge(Ga), охлажденного до  $T = 4.2 \text{ K}$ . Постоянная времени фотоприемника ( $\tau < 50 \text{ ns}$ ) позволяла регистрацию импульсов ТИ без искажений.

На рис. 1 показаны типичные осциллограммы импульсов ТИ и плотности тока в зависимости от длительности прикладываемых к образцу импульсов электрического поля при  $E = \text{const}$ . Исследуемое

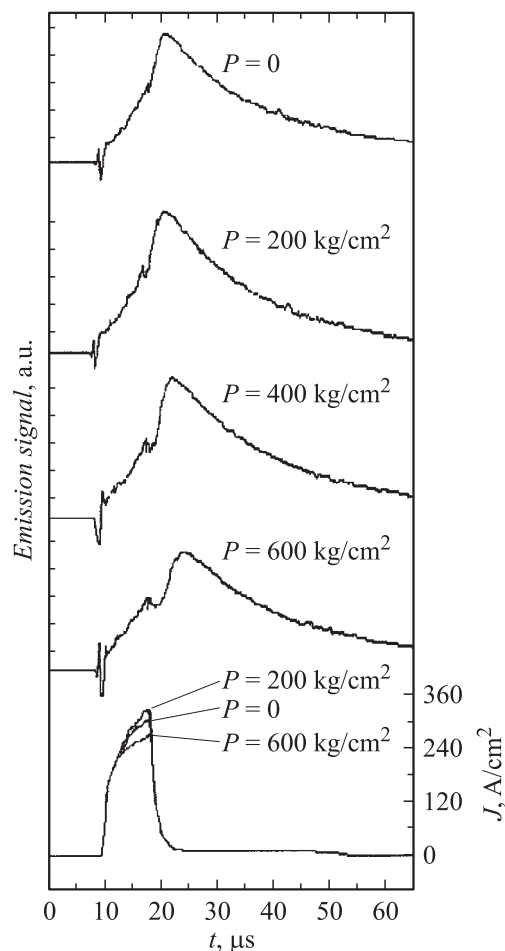


**Рис. 1.** Осциллограммы импульсов терагерцового излучения и тока (пунктирные линии) в зависимости от длительности прикладываемых к образцу импульсов электрического поля ( $t_E$ ) при  $E = 2600$  V/cm:  $a$  —  $t_E = 4.0$   $\mu$ s,  $b$  —  $t_E = 14.0$   $\mu$ s.

излучение возникало вслед за увеличением проводимости образца. Как видно из результатов эксперимента, импульс ТИ появляется с задержкой относительно заднего фронта импульса тока. Причем амплитуда и время задержки пика импульса излучения зависят как от амплитуды тока через образец, так и от длительности прикладываемого импульса электрического поля. С увеличением амплитуды импульса тока при  $t_E < 2.0$   $\mu$ s амплитуда и задержка импульса излучения увеличиваются. При увеличении длительности импульса прикладываемого электрического поля, когда  $E > 2000$  V/cm, интенсивность ТИ увеличивается, а время задержки импульса излучения уменьшается.

При приложении к образцу электрического поля достаточной амплитуды и длительности концентрация электронов в зоне проводимости вследствие ударной ионизации примесей существенно увеличивается. Концентрация свободных носителей при напряженностях электрического поля, достаточных для эффективной ударной ионизации, определяется из условий баланса между скоростями захвата, ударной ионизации и термополевой генерации. В сильных электрических полях сечение захвата уменьшается благодаря действию двух различных факторов. Во-первых, увеличивается средняя энергия носителей и соответственно уменьшается число частиц у дна зоны проводимости, которое непосредственно определяет захват. Во-вторых, в сильных электрических полях разрушаются связанные состояния с энергией связи меньшей, чем энергия примесного центра. В электрических полях  $E > 2000 \text{ V/cm}$  при гелиевых температурах дрейфовая скорость электронов равна  $V = 10^7 \text{ cm/s}$  и практически не зависит от электрического поля. Вследствие этого скорость ударной ионизации примесей зависит в основном от числа носителей в зоне проводимости, поэтому для достижения полной ионизации примесей в образце требуется некоторое время. С другой стороны, увеличение длительности импульса электрического поля приводит к повышению температуры решетки вследствие адиабатического разогрева образца, что ослабляет эффективность каскадного механизма захвата на притягивающие примесные центры и уменьшает накопление носителей заряда на возбужденных состояниях.

По окончании импульса электрического поля электроны термализуются на дно зоны проводимости, которые затем захватываются донорными притягивающими центрами. При лэксковском механизме захвата носителей из зоны на высокие возбужденные уровни темп релаксации возбужденных состояний достаточно большой. Однако по мере того как носители спускаются вниз по возбужденным уровням, величина энергетических ступенек между уровнями возрастает. При этом внутрицентровые безызлучательные переходы могут быть достаточно медленными, а время жизни носителей на таких возбужденных состояниях на много порядков превышает время жизни свободных носителей. Накопление носителей на этих долгоживущих возбужденных уровнях  $-2p_0$  может привести к инверсии населенностей между основными ( $1s(E)$ ,  $1s(T_2)$ ) и возбужденными состояниями ( $2p_0$ ) и возникновению индуцированного излучения.



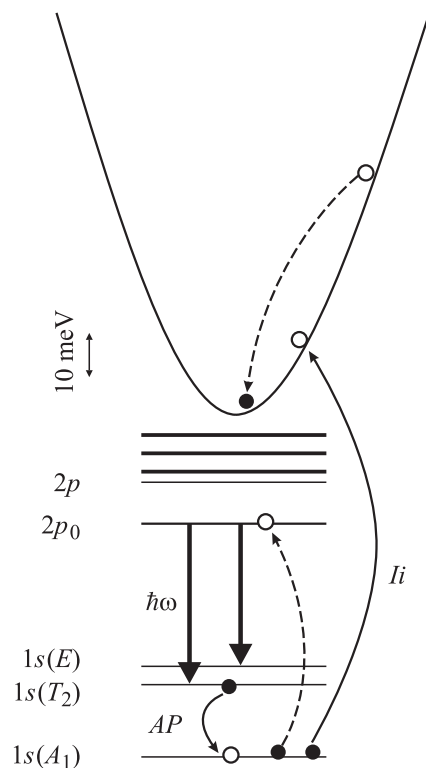
**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов терагерцового излучения и тока (нижние линии) при одноосной деформации кристалла при  $E = 2200$  В/см.

На рис. 2 показаны осциллограммы ТИ и тока образца кремния при одноосной деформации кристалла. Как видно из осциллограмм, в образце, подвергнутом ОУД, на заднем фронте импульса электрического поля наблюдается пикообразное возгорание ТИ. Амплитуда пика составля-

ет  $0.2 \div 2.5$  от общей величины интенсивности спонтанного излучения. Амплитуда и задержка пика ТИ зависят как от величины давления, так и от напряженности электрического поля. С увеличением давления до  $P \approx 600 \text{ kg/cm}^2$  интенсивность и время задержки импульсов ТИ растут. Дальнейшее повышение давления приводит к спаду интенсивности ТИ, а также уменьшению времени задержки. Отличительной особенностью характеристик излучения при ОУД и без давления является то, что при ОУД времена задержки импульсов излучения увеличиваются, а исчезновение задержки импульсов ТИ происходит при значительно больших значениях длительности импульсов электрического поля, прикладываемых к образцу.

При ОУД кристалла кремния происходит изменение зонной структуры, что приводит к изменению энергии и волновых функций мелкого примесного центра. Деформация приводит к расщеплению вырожденных основных и возбужденных состояний примесного центра, энергетическая ширина сетки возбужденных состояний при этом увеличивается. Эти эффекты, обусловленные ОУД, влияют на процессы генерации-рекомбинации, на процессы возбуждения, захвата и времени жизни электронов на долговременных возбужденных состояниях примесных центров.

Возможной причиной возгорания ТИ на заднем фронте импульса электрического поля является возрастание заселенности электронов на долгоживущих возбужденных состояниях  $-2p_0$  примесных атомов. В работе [4] теоретически показана возможность проявления так называемого ударно-теплового механизма захвата горячих носителей заряда на притягивающие примесные центры, который в определенных условиях может стать доминирующим даже над лэксковским каскадным механизмом. При гелиевых температурах и достаточной концентрации нейтральных атомов примеси в полупроводниках  $n$ -типа может возникнуть комбинационный канал захвата на притягивающие примесные центры. Физика механизма заключается в том, что при наличии нейтральных атомов примеси горячий электрон, испытывая неупругое рассеяние на них, теряет энергию на их возбуждение  $1s \rightarrow 2p$ , а сам захватывается в возбужденное состояние  $-2p$  положительного центра. На рис. 3 показаны схема возбуждения и рекомбинационные переходы в  $\text{Si(P)}$ . Неупругое рассеяние существенно облегчает захват электрона на возбужденный уровень примесного атома. Возбуждение нейтральных центров  $1s \rightarrow 2p$  могут осуществлять только те электроны, энергии которых  $\varepsilon \geq \Delta\varepsilon$ , где  $\Delta\varepsilon$  — энергия возбуждения примесного атома.



**Рис. 3.** Схема возбуждения и рекомбинационные переходы в Si(P):  $2p_0$  — долгоживущий уровень возбужденного состояния,  $\{1s(E), 1s(T_2), 1s(A_1)\}$  — основные состояния,  $\hbar\omega$  — терагерцовое излучение,  $Ii$  — возбуждение электронов при ударной ионизации, пунктирные линии — ударно-тепловой захват горячих электронов.

В импульсном пространстве в простейшей модели спектра это те электроны, которые находятся вне сферы с радиусом  $\Delta p = (2m\Delta\varepsilon)^{1/2}$ . Электроны с импульсом  $p$ , претерпевшие неупругое рассеяние, окажутся внутри маленькой сферы с радиусом  $(p - \Delta p)$ . Эти электроны могут: 1) рассеиваться квазиупруго за время  $\tau_{ak}$  и выйти из этой сферы; 2) ускоряться в поле  $E$  за время  $\tau_E = \Delta p/eE$  и снова приобрести

импульс  $\Delta p$ ; 3) быть захваченными за время  $\tau_3$  притягивающим  $N_+$  центром.

При определенных условиях существует такой интервал электрических полей, когда  $\tau_3 < \tau_E, \tau_{ak}$ , где  $-\tau_{ak}$  — время рассеяния на акустических фононах. При выполнении этих условий электроны, как только окажутся внутри сферы  $-\Delta p$ , сразу же будут захвачены на  $N_+$ -центры за время  $\tau_3$ , не успевая при этом квазиупруго рассеиваться или же ускоряться в поле до начального состояния. Указанное сложное неупругое рассеяние горячих электронов (потеря энергии и сразу захват) можно рассмотреть как единое составное рассеяние, которое может привести к существенному увеличению концентрации возбужденных состояний примесных центров.

Наблюдаемый в эксперименте пикообразный импульс ТИ, возникающий на заднем фронте импульса электрического поля, можно объяснить действием вышеприведенного комбинационного механизма захвата горячих электронов, так как при спаде импульса электрического поля (реально задний фронт импульса имеет существенную величину времени спада) в определенном интервале напряженности электрического поля параметры электронов в импульсном пространстве могут соответствовать условию ( $\tau_3 < \tau_E, \tau_{ak}$ ), что приводит к увеличению заселенности электронов на долгоживущих возбужденных состояниях примесных атомов.

## Список литературы

- [1] Pavlov S.G., Zhukavin R.Kh., Orlova E.E., Shastin V.N., Kirsanov A.V., Hubers H.W., Auen K., Riemann H. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5220.
- [2] Hubers H.W., Pavlov S.G., Riemann H., Abrosimov V., Zhukavin R.Kh., Shastin V.N. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 3600.
- [3] Lv P.-C., Troeger R.T., Adam T.N., Kim S., Kolodzey J., Yassievich I.N., Odnoblyudov M.A., Kagan M.S. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 22.
- [4] Качлишвили А.А., Хизанишвили М.Г., Хизанишвили Э.Г. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 2. С. 13.