

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕРМАНИЯ В ЖИДКИЙ ГЕЛИЙ

В.А.Цветков, А.С.Алексеев, М.М.Бонч-Осмоловский,
Т.И.Галкина, Н.В.Замковец, Н.Н.Сибельдин

Обнаружен перенос в жидкий гелий энергии, запасенной в электронно-дырочных каплях (ЭДК) при возбуждении германия. Выделение энергии ЭДК на поверхности образца приводило к вскипанию жидкого гелия, сопровождавшемуся излучением звука. Получены данные о времени формирования и времени жизни пузыря пара, образующегося при вскипании гелия.

ЭДК, образующиеся в полупроводниках при достаточно низких температурах и высоких уровнях накачки ¹, можно рассматривать как устойчивые сгустки энергии возбуждения, а дрейфовое движение капель под действием внешних сил ^{1,2} — как направленный перенос этой энергии в кристалле. В экспериментах, описанных ниже, ЭДК, созданные коротким световым импульсом, перемещались с околосвуковой скоростью к поверхности образца, где запасенная в них энергия высвобождалась за весьма малое время, значительно меньшее времени жизни ЭДК в объеме кристалла. Интенсивное выделение энергии ЭДК приводило к вскипанию жидкого гелия на поверхности образца, сопровождавшемуся возбуждением в гелии импульса первого звука.

Геометрия эксперимента показана на вставке рис. 1, а. Механически полированный образец Ge в форме диска диаметром 10 мм и толщиной $\xi = 0,72$ мм (ось диска параллельна оси $\langle 111 \rangle$) был смонтирован в специальной оправе таким образом, что одна его поверхность находилась в вакууме, а другая омывалась сверхтекучим гелием ($T = 1,8$ К). Поверхностная накачка образца осуществлялась излучением N_2 -лазера (длина волны $\lambda = 0,34$ мкм, длительность импульса $t_p \cong 10$ нс, максимальная энергия в импульсе $J_{max} \cong 120$ эрг, частота повторения 50 Гц, диаметр светового пятна на образце $\cong 3$ мм). ЭДК создавались при возбуждении находившейся в вакууме поверхности образца (луч I) и двигались под действием фононного ветра к противоположной поверхности ^{2,3}, достигнув которой они быстро погибали ⁴. В результате переноса через поверхность образца в жидкий гелий энергии неравновесных фононов, выделявшихся в процессе поверхностной безызлучательной рекомбинации составляющих капли электронов и дырок, в гелии возбуждался импульс звука и образовывался пузырь газообразного гелия, которые регистрировались по рассеянию зондирующего света ($\lambda = 0,63$ мкм) на этих неоднородностях ^{5,6}. Рассеянный свет, распространявшийся под малыми углами к зондирующему лучу, фокусировался с помощью собирающей линзы на катод ФЭУ.

При измерении времени движения ЭДК через образец зондирующий луч проходил от поверхности образца на расстоянии, значительно превышавшем размеры пузыря пара. Для измерения этого времени с помощью лазерного пучка II на поверхности образца, находившейся в гелии, возбуждался опорный звуковой импульс (импульс II на рис. 1, а), генерация которого связана с выходом в гелий неравновесных фононов, выделяющихся при термализации фотовозбужденных носителей тока ⁵. Смещение во времени между опорным импульсом и импульсом, возникающим в результате выделения энергии, запасенной в ЭДК (импульс I на рис. 1, а), дает время движения последних. Энергия в лазерном импульсе при возбуждении звукового импульса II подбиралась такой, чтобы импульсы I и II имели примерно одинаковую амплитуду. Благодаря этому оба звуковых импульса распространялись в гелии с одной и той же скоростью ⁶.

Для того, чтобы убедиться в том, что вскипание гелия при возбуждении находившейся в вакууме поверхности образца связано с переносом энергии ЭДК, а не неравновесными фононами, распространяющимися из области возбуждения, на поверхность образца, расположенную

во время опыта в гелии, был напылен болометр из гранулированного Al⁷. Если через болометр не пропускать электрический ток, то он не реагирует на потоки фононов. Сигнал на болометре в отсутствие тока ($I_6 = 0$) показан на рис. 1, б сплошной линией (на вставке приведена запись всего импульса). Этот сигнал является наложением двух импульсов: первый по времени узкий импульс связан с регистрацией ЭДК, движущихся к болометру под действием фонованного ветра, излучаемого на заключительном этапе термализации созданных светом носителей тока, а второй — с увлечением капель фононами, испускаемыми при релаксации горячего пятна^{2,3}. В рабочем режиме ($I_6 = 10$ мкА) сверхпроводящий болометр помимо ЭДК регистрирует поток неравновесных фононов, рождающихся в области возбуждения. Запись этого сигнала болометра дана на рис. 1, б прерывистой линией. Из сопоставления приведенных на рис. 1, а и б результатов видно, что время движения ЭДК до болометра практически совпадает со сдвигом во времени импульса I относительно импульса II, т.е. возбуждение звука на неосвещаемой поверхности образца действительно обусловлено выделением энергии, запасенной в ЭДК при накачке кристалла.

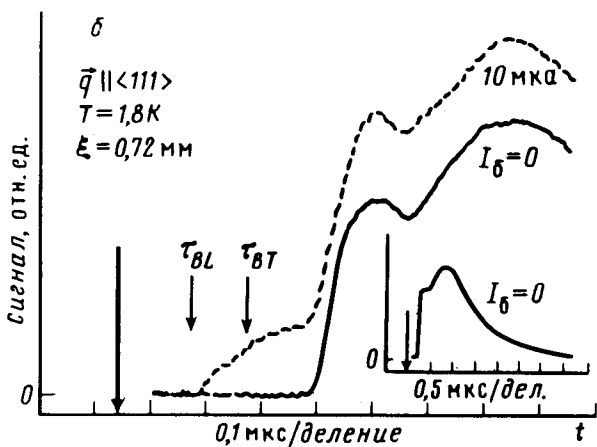
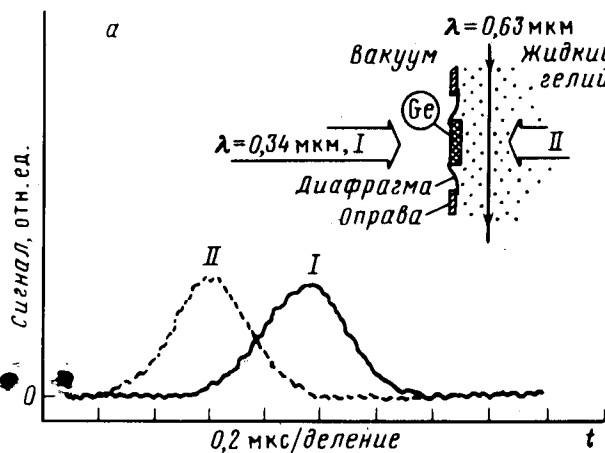


Рис. 1

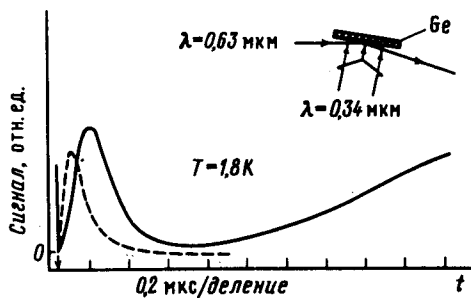


Рис. 2

Рис. 1. а — Сигналы рассеяния света на импульсах первого звука, возбуждавшихся при освещении омываемой жидким гелием (II) и расположенной в вакууме (I) поверхностей образца. При записи импульса I $J = 120$ эрг. На вставке — схема эксперимента; б — сигналы болометра при возбуждении находящегося в вакууме поверхности образца ($J = 120$ эрг). Жирной стрелкой отмечено положение импульса накачки. τ_{BL} и τ_{BT} — времена баллистического распространения, соответственно, продольных и поперечных акустических фононов. На вставке — полная запись сигнала

Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеянного света (сплошная линия) от времени ($J = 50$ эрг). Стрелкой отмечено положение импульса накачки. Пунктир — импульс на ФЭУ при его освещении возбуждающим светом. На вставке — геометрия опыта

Приведенные выше результаты показывают, что метод, основанный на регистрации звуковых импульсов, распространяющихся в жидком гелии от поверхности возбужденного образца, может быть использован для измерения скорости переноса энергии электронного возбуждения в кристалле. В связи с этим возникает вопрос о времени формирования звукового импульса. Для измерения этого времени был проведен эксперимент, схема которого показана на вставке рис. 2. Регистрировался свет, рассеянный звуковым импульсом и пузырьрем пара и распространявшийся под малыми углами к отраженному от возбуждаемой поверхности образца зондирующему лучу. Как видно из рис. 2, звуковой импульс в гелии (сплошная кривая) начинает развиваться без видимой задержки относительно импульса накачки. Нарастание сигнала рассеяния после окончания импульса звука обусловлено увеличением размеров пузыря пара на возбуждаемой поверхности. Полные записи импульсов рассеяния при двух интенсивностях накачки приведены на вставке рис. 3. На этом же рисунке показана зависимость полного "времени жизни" пузыря пара (длительности импульса рассеяния) от энергии в импульсе накачки. При малых J эта зависимость линейна, как, по-видимому, и следует ожидать для плоского пузыря пара, если его объем пропорционален энергии возбуждающего импульса.

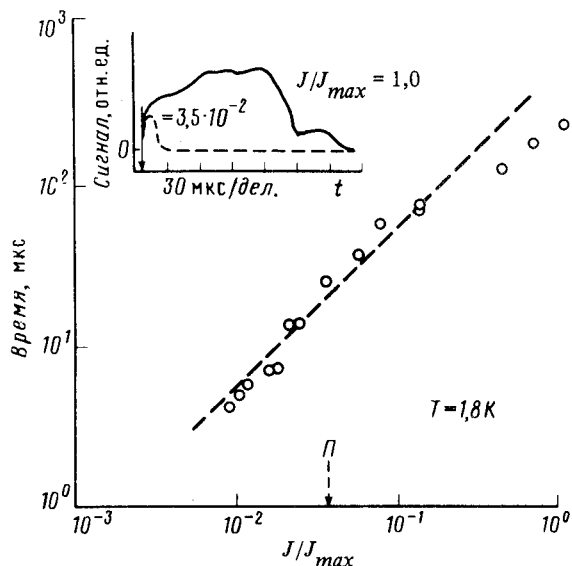


Рис. 3. Зависимость длительности импульса рассеяния на пузыре пара от энергии в импульсе накачки. Пунктирной стрелкой отмечен порог возбуждения импульсов первого звука. На вставке — записи импульсов рассеяния

Возбуждение первого звука связано с вскипанием гелия на поверхности образца ⁸⁻¹⁰. Поэтому из приведенных на рис. 2 данных можно заключить, что при использованном уровне накачки уже через $0,1 \div 0,2$ мкс после импульса возбуждения поверхность образца отделена от жидкого гелия пленкой пара, препятствующей выходу фононов из образца в жидкий гелий ¹¹. Следовательно, если возбуждение осуществляется импульсами достаточно большой мощности с длительностью $\gtrsim 0,1$ мкс, то эффективность увлечения ЭДК фононным ветром от возбуждаемой поверхности в глубь кристалла в образцах, погруженных в жидкий гелий, и в образцах, находящихся в вакууме, должна быть примерно одинакова. Результаты ряда экспериментов по исследованию динамики облака ЭДК подтверждают этот вывод ².

В заключение следует отметить, что возникновение пузыря пара на поверхности образца оказывает существенное влияние на поведение неравновесных фононов и носителей тока в возбужденном кристалле. Вскипание гелия сопровождается возникновением шумов фототока и поглощения микроволнового излучения неравновесной электронно-дырочной плазмой ¹², уве-

¹¹) Данные о кинетике образования пузыря газообразного гелия на поверхности металлических нагревателей приводятся в работах ⁸⁻¹¹.

личением размеров облака ЭДК ^{13,14} и другими эффектами. По-видимому, наблюдавшееся в работе ¹⁵ увеличение времени жизни горячего пятна ^{16,17} при возрастании интенсивности накачки также связано с образованием пленки пара.

• Мы благодарны Л.В.Келдышу, И.Б.Левинсону и Л.П.Межову-Деглину за плодотворное обсуждение.

Литература

1. Тиходеев С.Г. УФН, 1985, 145; 3.
2. Bagaev V.S., Galkina T.I., Sibeldin N.N. In: Modern Problems in Condensed Matter Sciences, Amsterdam, North-Holland, 1983, vol. 6: Electron-hole droplets in semiconductors, Eds. C.D.Jeffries and L.V.Keldysh, ch. 4, p. 267.
3. Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Тиходеев С.Г., Цветков В.А. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 177.
4. Аснин В.М., Ашкинадзе Б.М., Саблина Н.И., Степанов В.И. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 495.
5. Кавецкая И.В., Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Цветков В.А. ДАН СССР, 1979, 244, 559.
6. Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Цветков В.А., Эгген Б. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 224.
7. Алексеев А.С., Блинов А.Ю., Бонч-Осмоловский М.М., Галкина Т.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, 1984, №11, 12.
8. Гуляев А.И. ЖЭТФ, 1969, 57, 59.
9. Изнанкин А.Ю., Межов-Деглин Л.П. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 755; ЖЭТФ, 1983, 84, 1378.
10. Порошин В.Н., Данильченко Б.А. Укр. физ. журн., 1983, 28, 1191.
11. Danilchenko V.A., Poroshin V.N. Cryogenics, 1983, 23, 546.
12. Брагина Т.М., Леликов Ю.С., Шретер Ю.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 129.
13. Greenstein M., Wolfe J.P. J. de Physique, 1981, 42, Suppl. № 12, C6-274.
14. Greenstein M., Wolfe J.P. Phys. Rev. B, 1981, 24, 3318.
15. Tamor M.A., Greenstein M., Wolfe J.P. Phys. Rev. B, 1983, 27, 7353.
16. Hensel J.C., Dynes R.C. Phys. Rev. Lett., 1977, 39, 969.
17. Казаковцев Д.В., Левинсон И.Б. Письма в ЖЭТФ, 1978, 27, 194; ЖЭТФ, 1985, 88, 2228.