

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ КАПЛИ В ДВУОКИСИ ВАНАДИЯ

A.A. Бугаев, B.B. Гудялис, B.P. Захарченя, F.A. Чудновский

Сообщается об обнаружении анизотропии коэффициента отражения, которая индуцирована пикосекундным возбуждением с энергией кванта 1,17 эВ пленки двуокиси ванадия. Явление связывается с образованием электронно-дырочных капель.

Ранее¹ мы привели результаты по изучению быстрой кинетики развития фазового перехода металл – полупроводник (ФПМП) в пленке двуокиси ванадия при возбуждении ФПМП импульсами излучения длительностью $\sim 6 \cdot 10^{-12}$ с. Полученное в¹ время τ_i , в течение которого инициируется ФПМП, составляет $\tau_i \sim 10^{-12}$ с и оказывается меньше времени проleta фононов $\tau_i \sim d / v_{\text{зв}} \sim 10^{-10}$ с (d – толщина пленки, $v_{\text{зв}}$ – скорость звука). По этой причине мы провели детальное исследование переднего фронта кинетики развития ФПМП с временным разрешением $2 \cdot 10^{-11}$ с по методу временного зондирования с предварительным возбуждением². Одиночные пикосекундные импульсы были получены с помощью импульсного лазера YAG : Nd³⁺, работавшего в режиме самосинхронизации мод. Параметры усиленного одиночного импульса: длина волны излучения 1,06 мкм, энергия ~ 3 мДж, длительность $(18 - 20) \cdot 10^{-12}$ с, ширина спектра излучения $\Delta \lambda \sim 0,7$ Å, контраст $> 10^4$. Соотношение интенсивностей зондирующего и возбуждающего пучков $1 : 10^3$. Угол падения пучков на пленку не превышал 10° .

Как и в¹ в качестве исследуемого объекта использовалась пленка двуокиси ванадия, расположенная на алюминиевом отражающем слое, который в свою очередь, был нанесен на подложку из поликорда. Контролируемый в экспериментах параметр – коэффициент отражения пленки, изменение которого нами связывается с развитием ФПМП. Эксперименты проводились при температуре пленки $T = 300$ К и $T = 77$ К. С помощью пластинки $\lambda/2$ и призмы Глаана, размещенных на пути возбуждающего пучка, мы получили кинетику развития ФПМП для случаев, когда возбуждающий и зондирующий пучки были линейно поляризованы во взаимно ортогональных и параллельных плоскостях (см. рис. 1). Результаты, приведенные на рис. 1, показывают, что при возбуждении пленки двуокиси ванадия пикосекундным импульсом с плотностью мощности $P \sim 3 \cdot 10^8$ Вт/см² и энергией кванта $\hbar\omega = 1,17$ эВ изменение коэффициента отражения в течение $\sim 25 \cdot 10^{-12}$ с имеет ярко выраженный анизотропный характер. При этом большая ось эллипса поляризации ориентирована вдоль вектора E возбуждающего поля. Временной ход наведенной анизотропии $\gamma = (R_{||} - R_{\perp}) / (R_{||} + R_{\perp})$ приведен на рис. 2. Видно, что наведенная анизотропия имеет импульсный характер, совпадая по переднему фронту с импульсом накачки и незначительно отставая от него (на $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ с) по заднему фронту. Для более полного описания этого явления добавим, что оно наблюдается как при $T = 77$ К, так и при $T = 300$ К с той разницей, что при $T = 300$ К величина γ уменьшается ($\gamma \sim 0,1$).

Мы провели серию специальных экспериментов, чтобы убедиться, что наблюдаемое явление не есть результат интерференционного взаимодействия возбуждающего и зондирующего пучков, при котором происходит перекачка энергии возбуждающего пучка в направлении зондирующего. С этой целью мы меняли соотношение интенсивностей возбуждающего и зондирующего пучков от $1 : 10$ до $1 : 10^3$ при неизменной геометрии эксперимента. Однако, результаты измерений были получены те же, что и на рис. 1.

Причиной наблюдаемого явления, на наш взгляд, является образование электронно-дырочных капель (ЭДК) в полупроводниковой фазе пленки двуокиси ванадия, происходящее под действием мощного импульса накачки. В процессе образования жидккая капля с металлической проводимостью находится в электрическом поле световой волны. При этом следует ожидать появления электрострикционного эффекта, приводящего к деформации капли, в результате

тате чего капля принимает эллипсоидальную форму³. Задача о величине деформации сферической проводящей капли радиуса r с поверхностным натяжением σ , находящейся во внешнем электрическом поле, может быть решена по аналогии с³. Для этого запишем величины электростатической

$$U_{\text{эл}} \cong -\frac{3VE^2}{8\pi} - \frac{3V}{10\pi} \frac{a-b}{r} E^2$$

и поверхностной энергии

$$U_{\text{пов}} \cong \frac{7V\sigma}{2r} + \frac{V\sigma}{8r^3} (a-b)^2$$

для вытянутого эллипса с полуосами a и b ($a > b = r$, V – объем), находящегося в электрическом поле с напряженностью E . Минимизируя сумму $U_{\text{эл}} + U_{\text{пов}}$ по параметру $a - b$, получим

$$\frac{a-b}{r} = \frac{6}{5} \frac{rE^2}{\pi\sigma}$$

Это выражение справедливо для вытянутого эллипса близкого к сфере, т.е. для $\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \ll 1$. Оно позволяет оценить величину энергии поля E^2 , при которой электрострикционный эффект будет вытягивать ЭДК вдоль вектора E электрического поля в эллипс с полуосами $\frac{a-b}{r} \sim 0.1$. Для этого примем r и σ равными тем значениям, которые хорошо известны для ЭДК в Ge, т.е. $r \sim 10^{-4}$ см, $\sigma \sim 10^{-4}$ эрг/см²⁴. Тогда $E^2 \sim 2.5 \cdot 10^{-8}$ Дж/см³. Эта оценка показывает, что существующая в эксперименте плотность энергии поля ($\sim 5 \cdot 10^2$ Дж/см³) значительно больше приведенной величины и достаточна для деформации сферической капли в эллипс даже в том случае, если σ капли $\sim 5 \cdot 10^2$ эрг/см² (Al, Sn). Далее ясно, что объем пленки, заполненный ЭДК, которые имеют форму вытянутого эллипса и ориентированы большей полуосью вдоль вектора E светового поля накачки, будет обладать ярко выраженными анизотропными свойствами.

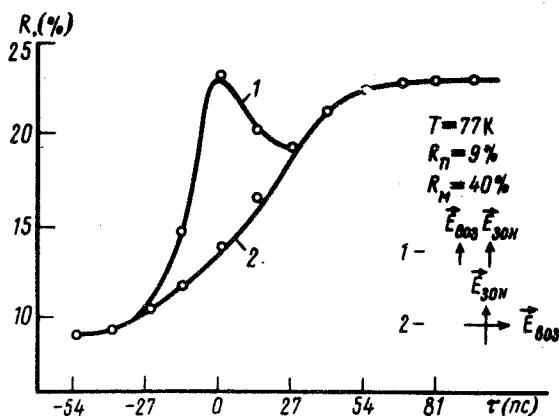


Рис. 1

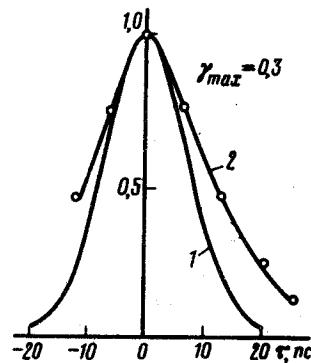


Рис. 2

Рис.1. Передний фронт кинетики развития ФПМП в пленке двуокиси ванадия. $R_{\text{п}}$, R_{M} – коэффициенты отражения в полупроводниковой и металлической фазах.

Рис.2 Вид наведенной анизотропии γ коэффициента отражения (кривая 1). Гауссова форма импульса накачки (кривая 2). Обе зависимости нормированы на свое максимальное значение

Итак, $d-d$ – электронно-дырочная плазма, возбужденная в полупроводниковом состоянии двуокиси ванадия квантумом с энергией 1,17 эВ при плотностях мощности накачки $P \sim 3 \cdot 10^8$ Вт/см² конденсируется в ЭДК за время $< 10^{-11}$ с.

Авторы глубоко признательны А.Г. Аронову за плодотворные обсуждения результатов настоящей работы.

Литература

1. Бугаев А.А., Гудялис В.В., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Письма в ЖЭТФ. 1981. 34, 452.
2. Иппен Э., Шенк Ч. Методы измерений. Сб. „Сверхкороткие световые импульсы” под ред. С. Шапиро. М.: Мир, 1981.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред М.: Гос. изд-во ТТЛ, 1957.
4. Райс Т., Хенсел Дж., Филлипс Т., Томас Г. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках . М.: Мир 1980.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 октября 1982 г.