

## **РЕГИСТРАЦИЯ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ**

**А. А. Игнатенко**

В последнее десятилетие наблюдается тенденция к ускоренному развитию информационных и вычислительных средств, основанных на законах квантовой механики. Ведутся работы по созданию квантовой вычислительной машины и осуществлению квантовой телепортации. Однако наиболее далеко в область практических исследований продвинулась квантовая криптография. Ее основная задача состоит в создании канала

передачи информации, абсолютная защита которого будет гарантироваться фундаментальными законами природы, позволяющими зафиксировать любую попытку проникновения извне [1].

Процесс создания секретного кода в квантовой криптографии осуществляется при помощи передачи одиночных фотонов, закодированных в определенном базисе, по оптическому волокну и опирается на важную теорему квантовой механики о невозможности клонирования заранее неизвестного квантового состояния. В этом случае любая попытка прослушать такой канал приведет к возникновению повышенного уровня ошибок, что может быть легко зафиксировано.

Для полноценной работы подобной криптографической системы необходимо иметь надежные источники и приемники одиночных фотонов инфракрасного диапазона (1.3 – 1.6 мкм), в котором оптическое волокно имеет наименьшие потери. К сожалению, большинство разработанных ранее типов фотодетекторов еще в недостаточной степени подходят для таких систем. Например, фотоэлектронный умножитель имеет недостаточную чувствительность в инфракрасном диапазоне, а лавинные фотодиоды, представляющие собой наиболее чувствительные полупроводниковые детекторы, обладают высоким уровнем собственного шума.

При решении проблемы регистрации одиночных фотонов большие надежды возлагаются на сверхпроводники. Остановимся подробнее на изящном решении, рассмотренном в работе [2]. В сапфировую подложку встраивается очень тонкий (порядка нескольких молекул) слой нитрида ниобия, сверхпроводящее состояние которого наступает при 4.2 К. Охладив полученную структуру до требуемой температуры, мы получаем сверхпроводник. Отличительной особенностью этого состояния является объединение электронов в куперовские пары, величина энергии связи которых на несколько порядков меньше, чем, ширина запрещенной зоны полупроводника. Поэтому энергии даже одного фотона инфракрасного диапазона достаточно, чтобы разрушить не одну пару электронов, в результате чего во всем сечении (ведь толщина образца ничтожна) нитрида ниобия сверхпроводящее состояние нарушается, т.е. сопротивление возрастает и наблюдается падение напряжения, сигнализирующее о регистрации фотона. Сверхпроводящее состояние восстанавливается через 30 пс, что может позволить детектировать интенсивные потоки одиночных фотонов и обеспечить достаточно высокое быстродействие детектора. Недостатком этого устройства является необходимость использования мощных охлаждающих установок.

На основе квантовых точек разработан генератор одиночных фотонов [3]. Основная идея заключается в том, что квантовая точка, поме-

щенная во внешнюю структуру, может обладать более выгодными условиями (меньшая ширина запрещенной зоны) для осуществления рекомбинации электрона и дырки с излучением фотона.

Для анализа указанных систем детектирования фотонов необходимо рассмотреть задачу исследования процессов взаимодействия света и

вещества. В данной работе исследовался процесс подобного взаимодействия фотона с нейтральным атомом, с последующей ионизацией. Следует отметить, что такая модель представляет собой простейший фотодетектор. В самом деле, если мы сможем каким-то образом зафиксировать процесс ионизации (т.е. образование свободного электрона), например, путем измерения тока, то зарегистрируем фотон. В общем случае, расчеты, сделанные для одиночного атома, можно обобщить на случай большого количества частиц, из которых собственно и состоит фотодетектор.

Моделирование подобного процесса – типичная задача квантовой механики, решение которой можно разделить на два этапа. Сначала необходимо найти энергетический спектр электрона в атоме и вне его. Атом в данном случае представляет собой потенциальную яму (рис. 1), высота которой соответствует энергии связи. Разумно выбирать характеристики атома таким образом, чтобы в потенциальной яме электрон находился на единственном (такие параметры характерны для валентных электронов щелочных металлов). В таком случае мы избегаем необходимости рассматривать энергетические переходы электрона внутри ямы и можем сосредоточиться на процессе ионизации. Может возникнуть вопрос о целесообразности вычисления спектра свободного электрона, который, как известно, не является дискретным. Однако существует особенность решения задачи, которая вынуждает ввести потенциальную стенку бесконечной высоты на некотором расстоянии от ямы. Для теоретического аспекта решения это не столь принципиально, так как на конечном этапе мы можем положить это расстояние равным бесконечности и получить решение исходной задачи. При численном моделировании подобное сделать, невозможно. Наличие стенки приведет к образованию конечного числа энергетических уровней, на которых может находиться свободный электрон. Определение энергетических уровней представляет

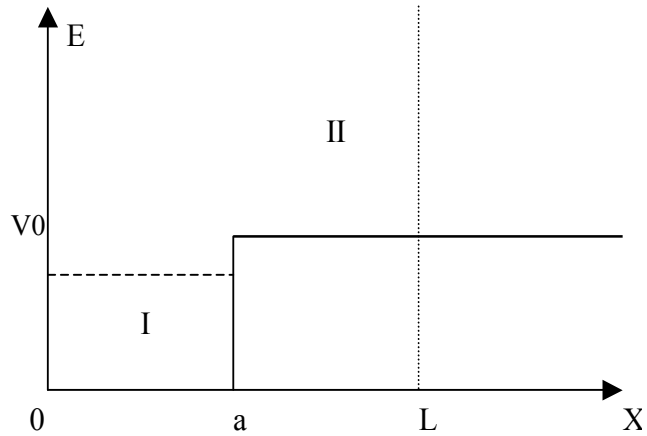


Рис. 1 Модель атома

собой численное решение двух трансцендентных уравнений. Далее производится расчет и нормировка волновых функций электрона. Важной частью первого этапа является нахождение матричного элемента перехода от дискретного спектра к непрерывному.

Второй этап состоит в нахождении динамики поведения электрона или, точнее, волнового пакета, соответствующего свободному электрону. Для этого требуется решить уравнение Шредингера для системы «фотон + нейтральный атом». Гамильтониан такой системы будет состоять из трех слагаемых, характеризующих соответственно атом, фотон и процесс их взаимодействия. В процессе решения получается система дифференциальных уравнений относительно коэффициентов, в общем случае комплексных, квадрат модуля которых есть вероятность нахождения электрона на определенном энергетическом уровне. Количество уравнений в системе соответствует количеству найденных энергетических состояний. Дальнейшее решение может осуществляться двумя путями. Первый – это использование встроенных возможностей решения дифференциальных уравнений, например, в среде Matlab. Второй состоит в применении к системе преобразования Фурье, в результате которого производные исчезнут, и мы получим систему линейных уравнений, которая легко решается численно. К полученному решению применяется обратное преобразование Фурье. Зависимости, полученные после завершения обоих этапов решения исходной задачи, были положены в основу нахождения динамики поведения волнового пакета.

Рассчитанные вероятности нахождения электрона на определенном уровне – гармонические функции, с изменяющей фазой и периодом (рис. 2) При чем период увеличивается с номером энергетического уровня. Как и

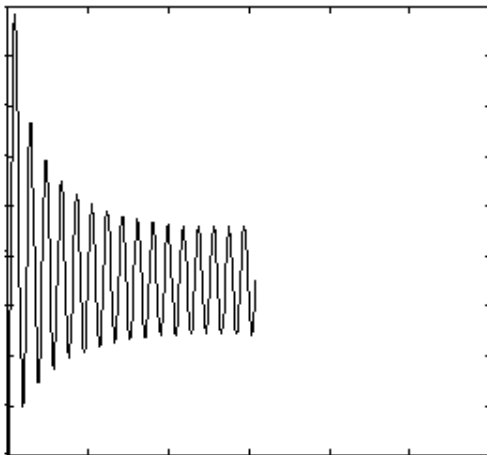


Рис. 2 Вероятность нахождения электрона на энергетическом уровне

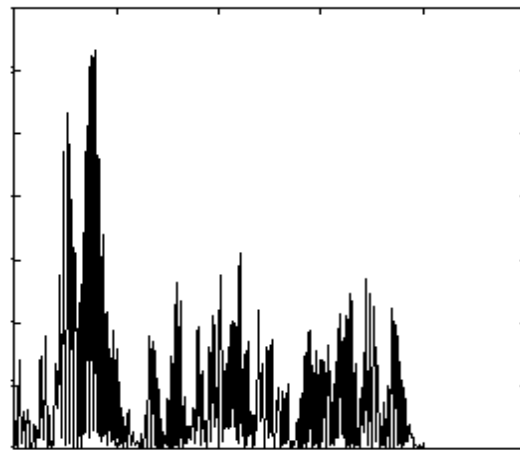


Рис. 3 Волновой пакет, соответствующий свободному электрону

следовало ожидать, вероятность нахождения электрона на основном уровне атома после взаимодействия с фотоном представляет собой быстро убывающую функцию. В обычном представлении свободный электрон будет обладать энергией равной сумме энергий фотона и электрона в атоме. Расчеты, однако, показывают, что существует ненулевая вероятность нахождения электрона на значительно более высоких энергетических уровнях. Волновой пакет представляет собой однородную структуру (рис. 3), которая распространяется в направлении потенциальной стенки бесконечной величины, от которой происходит отражение и движение в обратную сторону.

Данная задача предполагает дальнейшее развитие в плане нахождения тока, образуемого свободным электроном, и исследований возможностей различных материалов при их использовании в качестве рабочих в детекторах фотонов.

#### Литература

1. *Килин С. Я.* Квантовая информация // УФН. 1999. 169. С. 507.
2. *Gol'tsman G., Sobolewski R.* Picosecond superconducting single-photon optical detector // Applied Physics Letters. August 6, 2001. Vol. 79, Issue 6. P. 705–707.
3. *Yuan Z., Kardynal B. E., Stevenson R. M., Shields J., Lobo C. J., Cooper K., Beattie N. S., Ritchie D. A., Pepper M.* Electrically Driven Single-Photon Source // Science. 2001. 295. P. 102–105.