

Биология: Киборги

Извечная мечта многих членов технократического общества – быстрая замена или даже улучшение «природных» человеческих органов – частей тела. Очень спорный вопрос, но... соединение электроники и живых клеток все равно является одним из наиболее интересных направлений нанотехнологий, биотехнологий, биофизики и медицины и с точки зрения фундаментальных исследований, и практической значимости полученных результатов.

Может ли полупроводниковый транзистор принимать сигналы от нервной клетки? (1 балл)

Может. При возбуждении нервной клетки происходит изменение локального заряда мембраны, которое воспринимает транзистор.

Может ли нервная клетка принимать сигналы от электронной микросхемы? (1 балл)

Может. Чип-электросхема содержит транзисторы и конденсаторы. Когда на ней культивируют нервные клетки, транзисторы получают от них сигналы, а конденсаторы, под управлением транзисторов, посылают сигналы от электроники – нейронам. Возбуждение нейрона возникает при деполяризации мембраны до или выше порогового уровня; этот процесс называется также стимуляцией, или раздражением. Стимулом служит приложенный извне электрический ток, во время протекания которого происходит деполяризация мембраны.

Может ли нервная клетка обмениваться сигналами с электродами микрометровых и нанометровых размеров электронных устройств? (1 балл) Обоснуйте свои ответы.

Может. При этом стимулирующим нервную клетку (т.е. вызывающим деполяризацию мембраны клетки) электродом является катод. Он должен иметь наименьшую поверхность, т.е. быть максимально острым. Анод должен располагаться на как можно большем расстоянии и иметь большую поверхность, т.к. он вызывает гиперполяризацию нейронов. Анод является индифферентным электродом.

Из каких материалов должны быть изготовлены электроды, контактирующие с нервными клетками? (2 балла)

Электроды, контактирующие с нервными клетками, должны быть изготовлены из химически инертных материалов, обладающих высокой электропроводностью. Т.к. при функционировании электродов в живых тканях электрохимические влияния, возникающие при увеличении плотности электрического заряда ведут к эрозии металлических электродов, то в качестве материалов для их изготовления должны быть выбраны металлы и их оксиды, обеспечивающие наибольшее сохранение заряда: платина (Pt), золото (Au), хлорид серебра (AgCl) и оксид иридия (IrOx). Можно использовать также кремниевые электроды и электроды из электропроводящих полимеров, например, из полипирролов. Материалы для изготовления электродов должны обладать высокой биосовместимостью по отношению к нервным клеткам.

Каково преимущество наноматериалов при изготовлении таких электродов? (1 балл).

Перспективными наноматериалами для изготовления электродов, контактирующих с нервными клетками, являются углеродные нанотрубки и кремниевые нанонити. Возможно также изготавливать электроды из нанонитей на основе платины, золота, хлорида серебра и оксида иридия, а также электропроводящих полимеров.

Чем меньше электрод, тем меньшая нужна сила тока, чтобы возбудить рецепторный потенциал. На Рис.1 показано зависимость необходимой силы тока для достижения потенциала в 30 мВ от расстояния для электродов разных размеров.

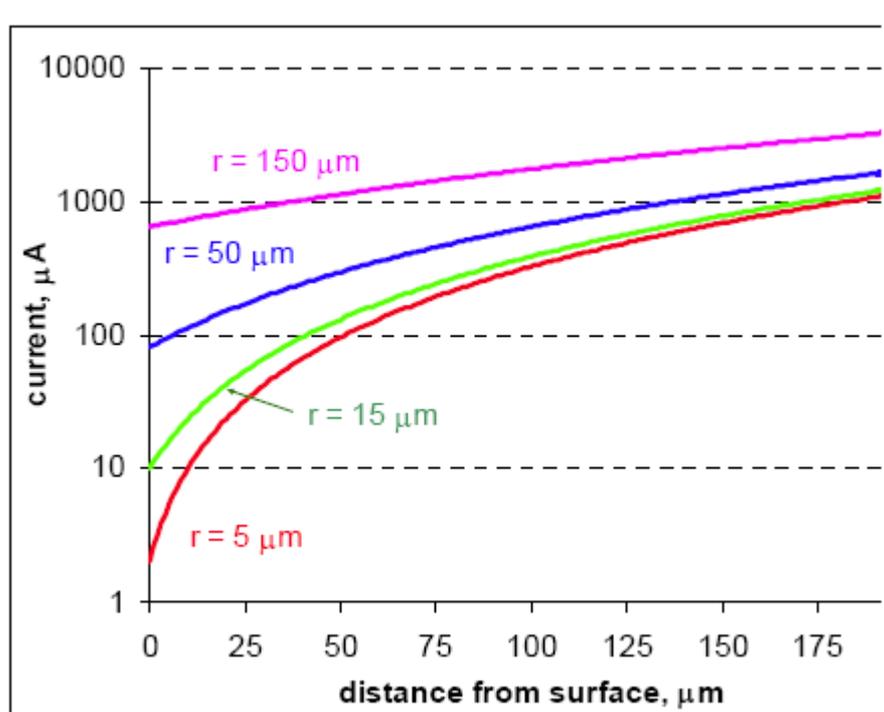


Рис 1. Зависимость силы тока (в мкА), генерирующей падение напряжения в 30 мВ на каждый 10 мкм длины клеток от расстояния до поверхности электрода (мкм). r – размеры электрода.

Кроме того, чем меньше расстояние от электрода до клетки, тем меньше электрохимические влияния, происходящие из-за появления ёмкостной связи и увеличения плотности электрического заряда, и нагрев тканей, происходящие из-за рассеивания тепла при электрическом потоке в проводящей среде живых тканей. Из вышесказанного следует, что чем меньше отдельный электрод и чем он ближе к стимулируемым клеткам, тем меньше энергопотребление в целом, и тем выше эффективность (и ниже наличие побочных влияний) имплантируемого электрического устройства. Следует также принять во внимание значительное уменьшение инвазивности (повреждения) тканей при имплантации электродов нанометровых размеров.

Каков механизм передачи сигналов между нервной клеткой и транзистором (или электродом), если это возможно? (2 балла)

Взаимодействие между нейроном и транзистором (или электродом) происходит благодаря перемещению ионов натрия через ионные каналы в клеточной мембране, что приводит к развитию потенциала действия и изменению локального заряда мембраны (деполяризации), на который и реагирует транзистор. В свою очередь, управляемый

электроникой заряд на конденсаторе смещает заряд на мембране до порогового значения, что приводит к развитию потенциала действия за счет потока ионов натрия через мембрану, что и является реакцией нейрона на сигнал извне. Такой же механизм обмена сигналами нейрона с электродами с учетом геометрических и электрохимических особенностей электродов.

Какими характеристиками должен обладать транзистор, чтобы была возможна передача сигналов между ним и нервной клеткой? (2 балла)

Для этих целей необходимо использовать полевой металл-оксид (диэлектрик)-полупроводниковый (МО(Д)П) транзистор на основе кремния и оксида кремния. Транзистор должен обладать пониженным шумом и работать в микроощном режиме (мкВт), т.к. культивируемая на нем клетка становится частью транзистора (см. рис. 2). Поэтому электромагнитный ток, проходящий через клетку должен по своим параметрам соответствовать параметрам сигналов, которыми обмениваются сами нейроны (см. ниже)..

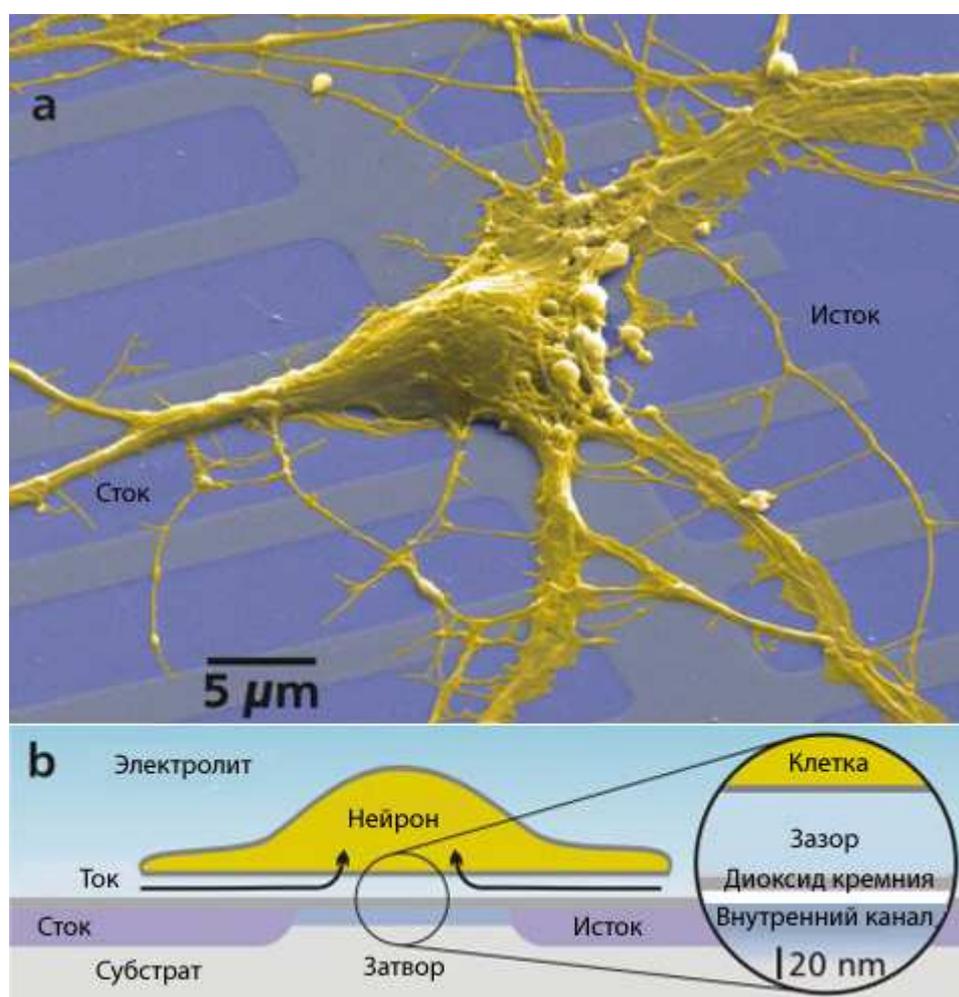


Рис. 2. Один нейрон крысы на микросхеме. Ионный поток в клетке превращает её в составную часть полевого транзистора, позволяя клетке влиять на работу электроники. Опыт Петера Фромхерца (фото с сайта biochem.mpg.de).

Какие характеристики должны иметь сигналы от электронного устройства, чтобы нервная клетка могла их воспринять? (3 балла)

Сигнал должен представлять собой постоянный, а не переменный электрический ток. Возможно приложение прерывистого постоянного тока. В этом случае временной интервал между последовательными сигналами не должен быть меньше 2 мс или частота возбуждения нервной клетки не должна быть более 500 Гц, т.к. минимальный период рефрактерности нейрона составляет 2 мс. Для возбуждения нейрона требуется приложить напряжение в 25-30 мВ: от потенциала покоя (-80 мВ) до порога потенциала действия (-50 мВ). Сила тока сигнала должна быть минимальной: от 10 нА до 10 мкА в зависимости от размеров и материала электрода.

Какие факторы могут препятствовать передаче сигналов между нервной клеткой и транзистором (или электродом)? (2 балла)

Низкая биосовместимость по отношению к нервным клеткам, низкое электрохимическое сопряжение между мембраной нейрона и материалом транзистора (для предотвращения этого эффекта транзистор покрывают специальными белками); слишком высокое (низкое) напряжение; слишком высокая (низкая) сила тока; наводка между соседними электродами, если их несколько; эрозия металлических электродов при их функционировании, низкий уровень энергосбережения электродов; нагрев тканей и др.

Можно ли ввести электрод нанометровых размеров в клетку, не повредив ее? Предложите свой способ введения. (3 балла)

Творческий вопрос. Одним из оригинальных способов неинвазивного введения нанозлектродов в клетку является культивирование клеток на подложке с кремниевыми нанонитями (рис. 3).

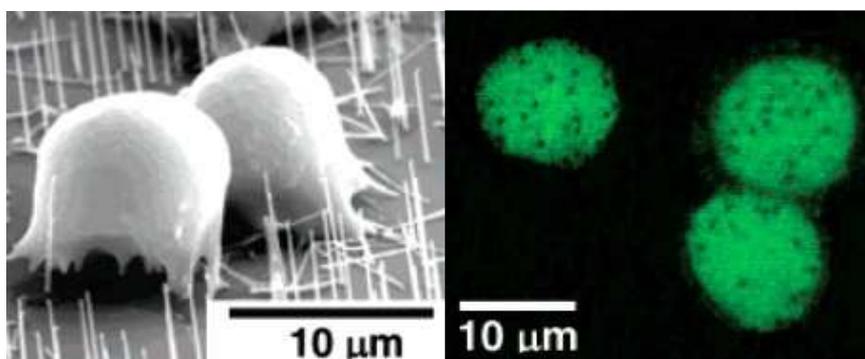


Рис. 3. Пара мышечных клеток, пронизанных кремниевыми нанозлектродами (слева) Флуоресцирующие клетки мышцы (справа) хорошо показывают точки проникновения проводов (фото Peidong Yang et al).